

PÉDOLOGIE ET DÉVELOPPEMENT

O.R.S.T.O.M. — B.D.P.A.

1968

ERRATA

- Page 7 - ligne 25 - supprimer " pour la plupart d'entre elles "
- " 11 - ligne 22 - supprimer " notablement "
- en bas de page souligner guinéen, soudanien, sahélien
- " 12 - ligne 14 - forêt " ripicole " et non rizicole
- " 16 - dernière ligne - remplacer " dans " par " quelconque "
- ligne 20 - ajouter " y " : " puisse y observer "
- " 17 - 1ère ligne - remplacer " aucun des " par " dans les "
- 2ème ligne - remplacer " ni " par " et " " moins " par " plus "
- (et encore plus du peuplement)
- 18ème ligne - remplacer " a bien " par " présente "
- " 19 - 1.6 - Conclusion
- 1.7 - Bibliographie
- " 23 - Supprimer le trait sous Derrcolon
- " 26 - ligne 17 - écrire sulfate de " calcium "
- ligne 6 - écrire dessus (I)
- " 28 - ligne 5 - écrire zone " inter "
- 6 " tropicale "
- " 30 - ligne 21 - Mulch : " formation "
- ligne 25 - appellation oblique
- ligne 27 - riche en " hydroxyde ou " oxyde
- ligne 28 - id.
- " 31 - gravillon :
- " 32 - ligne 14 - comprend (rayer " ra ")
- 3.1 - les constituants organiques
- " 33 - 3.1.1. - l'humus
- 3.1.2. - Composition chimique
- " 34 - ligne 19 - " polymérisation "
- " 36 - ligne 5 - 3.1.4. Les Propriétés
- 3.2. les constituants minéraux
- " 37 - ligne 1 - 3.2.1. les minéraux primaires
- " 39 - ligne 1 - 3.2.3. les produits....
- " 42 - ligne 29 - Montmorillonite $Si_4 (Al_{3-x}, Mg_x) \dots$
- ligne 30 - Beidellite $(Si_{4-x} Al_x) Al_3$
- ligne 31 - de l'aluminium " en position octaédrique " de la beidellite

- Page 44 - ligne 13 - 3.2.3. 3. Les oxydes et hydroxydes
 Dans le paragraphe " les oxydes " souli-
 gner " corindon, magnétite et magnémite "
- " 45 - les hydroxydes - écrire $M(OH)_3$
- " 47 - 3.2.4. les produits amorphes
- " 50 - ligne 3 - 624 + 694 + 450 pp.
- " 53 - ligne 20 - forêt ombrophile, " décidue ", " xerophile
- " 55 - ligne 20 - forme du modelé : en région forestière
 ligne 28 - les sols " à " cuirasse (et non de)
- " 59 - ligne 16 - notés"; ne"pas les
- " 61 - ligne 11 - barkhane
- " 62 - ligne 14 - l'érosion en " lavaka "
- " 63 - dernière ligne - " en ajoutant le signe" supprimer
- " 64 - ligne 8 - au lieu de " 2,5 cm " " 2 cm "
 ligne 9 - au lieu de " 2,5 à 6 cm " " 2 à 5 cm "
 ligne 10 - au lieu de " entre 6 et 12,5 cm " " 5 et 15 cm "
 ligne 12 - au lieu de " à 12,5 cm " " 15 cm "
 ligne 19 - ajouter poches jointives, " dont la profondeur est
 supérieure à la largeur ".
- " 65 - ligne 21 - écrire " Le code de couleurs " Munsell Soil color chart "
 est utilisé par la majorité des pédologues "
 ligne 25 - comprend " normalement " 175 cartons
- " 70 - tableau dimension 0,2 - 5 cm
- " 71 - ligne 26 - le manipule), constitué
- " 75 - ligne 26 - parlant d'inclusion ou de
- " 77 - tableau 2 - en haut et à gauche : " dimension en mm. "
 2ème colonne : mettre devant tous les chiffres <
 5ème colonne : mettre devant tous les chiffres >
- " 79 - ligne 5 - écrire on parle parfois de " porosité " vésiculaire
- " 80 - ligne 2 - capacité " au " champ
- " 85 - souligner : faces de glissement, tubes ferruginisés, charbon de bois,
 formations dues à la faune, efflorescences salines....
- " 94 - ligne 22 - végétaux frais ne " représente " qu'une
 ligne 29 - souligner " évapotranspiration potentielle "

- Page 95 - ligne 22 - Base Exchange Capacity (ou BEC)
 ligne 27 - au lieu de " exprimé en me/100 g. " écrire :
 exprimé en milliéquivalents pour 100 g. de sol.
 en bas de page : renvoi
 (1) L'équivalent s'obtient en divisant la masse atomique
 de l'élément par sa valence. Exemple :
 pour le sodium $\frac{23}{1} = 23$ g. le milliéquivalent = 0,023 g.
 pour le calcium $\frac{40}{2} = 20$ g. le milliéquivalent = 0,020 g.
- " 96 - ligne 12 - "hydroxyles "
 " 97 - ligne 21 - à partir de pH 6
 " 99 - ligne 27 - micelles à côté des ions H⁺
 " 102 - dernière ligne - distinguee
 " 103 - ligne 1 - " s'exprimee "
 ligne 2 - qui " peut "
 ligne 3 - mots sont
 " 104 - milieu et bas - complexe H + KCle
 " 107 - ligne 16 - rH₂
 " 108 - souligner les mots " fusion alcaline " et " réactif triacide "
 " 111 - tableau 5 - abaisser le mot " Benzidine " dans la case vide
 située juste au-dessous
 " 115 - ligne 16 - " doivent "
 " 116 - sous 7.2.7. Les groupes secondaires placer :
 7.3. Bibliographie
 dernier paragraphe : supprimer " le siège "
 dernière ligne : au lieu de " valables " mettre " variables "
 " 117 - ligne 12 - les formes des bactéries
 " 118 - ligne 19 - ; pays où en contre partie
 " 119 - supprimer (Fig. 1 cycle de l'azote)
 ligne 4 - directement NO₃⁻ en N₂
 " 120 - ligne 15 - et même, à des sulfates
 " 122 - ligne 15 - tel le bore
 " 123 - ligne 4 - hémicellulolytiquese ou
 ligne 6 - repererae
 ligne 13 - xantophylliense à réserves
 ligne 18 - Nostoce Oscillatoria

- Page 125 - ligne 16 - groupements fauniques
- " 127 - ligne 14 - hém^uatimétrique
- " 129 - ligne 9 - supprimer " ailleurs grâce à "
- " 130 - ligne 15 - trombidiforme
- " 131 - ligne 20 - faune, mais se pr^uêtent moins....
- " 132 - bas de la page - termites construisant utilis^uent
- " 133 - ligne 13 - rapport S/T habituellement
- ligne 15 - nodules calcaires
- " 134 - ligne 13 - leur nid, de la
- ligne 25 - Elat^uérides
- ligne 31 - se nour^urit
- ligne 36-37 - Bibionidae, Tipulidae, Scialidae, Scatopsidae
- " 135 - ligne 20 - Oryctéropes
- " 136 - ligne 1 - 7.3. Bibliographie
- Hardy (F.) - 1931
- " 142 - ligne 8 - Araucaria
- " 154 - ligne 27 - Cypérus C. C.
- " 159 - ligne 16 - écrire : sols encore relativement fertiles
- ligne 26 - Philippia
- ligne 30 - ions toxiques du manganèse ou de l'aluminium
- " 166 - ligne 6 - appauv^urissement
- " 178 - ligne 7-8 - (Novembre à Février Nord)
- ligne 23 - au lieu de " données ", mettre " variétés "
- " 181 - ligne 4 - après bananier). ajouter : " Certains vallées étroites sont sableuses et peu utilisables ".
- " 182 - ligne 2-3 - aménagement nécessaire pour l'irrigation
- " 187 - ligne 16 - humidité au champ
- ligne 27 - écrire : sous irrigation. En effet
- ligne 30 - pour les cultures ; par contre, en sol sableux, toutes les pluies
- " 188 - Souligner : " humidité au champ " " Rétention d'eau "
- " humidité édaphique "
- $$He = \frac{\sqrt{Pu \times Eu}}{St}$$

- Page 192 - b) Calcul d'un indice de drainage (Fig. 18)
- " 197 - G E P P A = Groupe d'Etude des Problèmes de Pédologie Appliquée.
- " 200 - Souligner : Conclusion concernant
- " 201 - ligne 32 - au lieu de : au-dessous de 80, lire au-dessus de 80
- " 202 - $P_u = \text{Porosité utile} = \frac{\text{Porosité à saturation}}{\text{Porosité à } pF \ 4,2}$
- " 203 - ligne 5 - $\sqrt{P_u \times E_u} = 12$
- " 204 - dans conclusion humidité
- " 206 - ligne 3 - Nigérien (bruns subarides)
- " 210 - dans tableau, arachide mettre dans case vide " faible "
- " 211 - Devant tous les chiffres mettre 10 ; placer 10 dans la suite du chapitre.
- " 212 - ligne 22 - guide à l'interpréteur qui devra
- " 214 - ligne 17 - après non dégradée, supprimer " steppe, savane marécageuse "
- " 216 - ligne 4 - supprimer vers " le " pH
 ligne 5 - au-dessus de pH 6
 ligne 8 à 11 - supprimer la phrase " Les sols des régions
 avant dernière ligne : supprimer sols (" faiblement ") ferrallitiques
- " 218 - tableau 9 - " Somme des bases " à mettre à la place de S. mé
- " 220 - ligne 2 - au lieu de " structure " mettre " saturation "
 ligne 23 - tableaux n° 10 et 11
- " 225 - tableau 16 - sols ferrallitiques sur roches " basiques "; au lieu de basiques mettre " idem "
- " 226 - ligne 21 - extrêmes inférieures à 4 ou supérieures à 8,5
- " 227 - ligne 19 - sols ferrallitiques faiblement désaturés
- " 228 - ligne 3 - résultat " positif "
 ligne 12 - nigérien pour des teneurs en azote
- " 232 - tableau 20 - 0,1 ‰ et au-dessous.
- " 233 - tableau 21 - Colonne centrale : remplacer latéritisé par "ferrallitique"
- " 234 - ligne 8 - écrire P_2O_5 total, au-dessous de cette teneur, il n'existait que
- " 238 - tableau 24 - écrire : " Sol ferrallitique faiblement désaturé "

- Page 239 - tableau 25 - au-dessous de Sol ferrugineux tropicaux écrire
" Côte d'Ivoire "
- " 242 - ligne 10 - écrire partie importante peut être fixée entre
les feuillets des argiles mais peut être libérée et
- " 245 - ligne 12 - (somme des bases)²
(argile + limon %)
- " 247 - ligne 16 - écrire dans les sols du Simon aux Antilles
(Martin - Prevel)
- " 249 - 3^e réaction écrire $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$
- " 253 - Sous la formule, écrire : irrigation (Fig. 39)
ligne 26 - et bien drainant. Dans ce cas, les eaux
- " 258 - Réf. RICHARDS : U.S.D.A. Agric. Handbook
- " 260 - après DUCHAUFOR, écrire ERHART
- " 264 - ligne 7 - écrire Fe^{2+} Fe^{3+}
- " 270 - ligne 19 - au lieu de " En fait ", écrire " En effet "
- " 271 - ligne 22 - au lieu de "rôle primordial", écrire " rôle aussi
important "
- dernière ligne - montmorillonite - nontronite
- " 274 - ligne 11 - supprimer " tel qu'il est (p. 1. 2b 1)
ligne 13 - physico-chimiques, on peut en rajouter
- " 277 - ligne 7 - au lieu de nontronite mettre " montmorillonite "
- " 284 - dans " podzolisation " écrire horizon A₀
- " 287 - ligne 22 - silcrete
- " 290 - Halomorphes autres que le chlorure de sodium et le gypse
- " 325 - écrire : G E D R O I Z
- " 329 - ligne 10 - juxtapositions
- " 331 - ligne 2 - permettra
dernier paragraphe - L'unité de base est généralement
- " 336 - ligne 3 - à placer ces limites et déterminer où doivent être
situés les profils à examiner....
ligne 24 - au niveau des familles et des séries
- " 337 - ligne 10 - Si elles ne fournissent pas toujours de limites

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION

PREMIERE PARTIE - Le Milieu

Chapitre 1. Généralités sur les zones intertropicale et méditerranéenne

- 1.1. Généralités
- 1.2. Le milieu équatorial
- 1.3. Le milieu tropical
- 1.4. Le milieu désertique
- 1.5. Le milieu méditerranéen
- 1.6. Conclusion
- 1.7. Bibliographie

DEUXIEME PARTIE - Le Sol . Définitions et constituants

Chapitre 2. Quelques définitions sur le sol

- 2.1. Le Sol. Sa définition
- 2.2. Nomenclature des horizons
- 2.3. Quelques horizons particuliers

Chapitre 3. Les constituants du sol

- 3.1. Les constituants organiques : l'humus, fractionnement, composition chimique, formation, propriétés
- 3.2. Les constituants minéraux : minéraux primaires et secondaires - Produits de synthèse cristallisés et amorphes.
- 3.3. Bibliographie

TROISIEME PARTIE - La Caractérisation du Sol

Chapitre 4. Données concernant l'environnement

- 4.1. Généralités
- 4.2. Végétation et système de culture
- 4.3. Roche-mère et matériau originel
- 4.4. Géomorphologie
- 4.5. Relief et pentes
- 4.6. Drainage
- 4.7. Inondation
- 4.8. Présence de pierres
- 4.9. Présence de roches
- 4.10. Erosion

Chapitre 5. Description des profils

- 5.1. Epaisseur et limites des horizons
- 5.2. Couleur
- 5.3. Matière organique et calcaire
- 5.4. Texture
- 5.5. Structure
- 5.6. Porosité
- 5.7. Consistance
- 5.8. Cohésion
- 5.9. Enracinement
- 5.10. Formations particulières

Chapitre 6. Etude du sol au laboratoire.

A. Caractéristiques physiques, chimiques et minéralogiques

- 6.1. Caractéristiques physiques du sol : texture, structure ; l'eau et le sol, le profil hydrique, besoins en eau.
- 6.2. Caractéristiques chimiques : capacité d'échange et cations échangeables ; réaction du sol, potentiel de redox.
- 6.3. Caractérisation des constituants minéraux : méthodes chimiques, thermiques ; emploi des rayonnements, d'électrons ; interprétation.

Chapitre 7. Etude du sol au laboratoire

B. Caractéristiques biologiques

- 7.1. La flore : les bactéries; les algues; les champignons.
- 7.2. La faune : protozoaires, nématodes, vers de terre, microarthropodes, termites, autres insectes, autres groupes.
- 7.3. Bibliographie de la 3^e partie

QUATRIEME PARTIE - Les relations entre les sols et la végétation.

Chapitre 8. La végétation et les conditions édaphiques

- 8.1. Action du sol sur la végétation
- 8.2. Modalités d'adaptation de la végétation
- 8.3. Végétation naturelle et connaissance du milieu édaphique
- 8.4. Végétation et aménagement
- 8.5. Conclusion

Chapitre 9. Etude des facteurs de la fertilité des sols

A. Les facteurs extérieurs ; les facteurs physiques

- 9.1. Généralités
- 9.2. Les facteurs climatiques ; action directe et indirecte
- 9.3. Les facteurs physiques dans les relations sols/plantes
l'eau dans le sol ; la structure du sol.
- 9.4. Conclusion

Chapitre 10. Etude des facteurs de la fertilité des sols

B. Les facteurs chimiques

- 10.1. La matière organique dans les sols tropicaux : matière organique ; azote minéral.
- 10.2. Le phosphore dans les sols tropicaux : analyse, phosphore total, phosphore assimilable.
- 10.3. Les bases échangeables dans les sols tropicaux
analyse ; le complexe absorbant et les bases ; les sols calcaires ; les sols salés et les sols à alcalis.
- 10.4. Conclusion
- 10.5. Bibliographie de la quatrième partie

CINQUIEME PARTIE - La genèse des sols, leur classification et représentation

Chapitre 11. Les grandes tendances de la pédogenèse en zones intertropicale et méditerranéenne. Les processus de formation du sol.

- 11.1. Genèse des minéraux argileux
- 11.2. Accumulation de la matière organique
- 11.3. Accumulation des hydroxydes.
Ferrallitisation, fersiallitisation, induration.
- 11.4. Accumulation du calcaire
- 11.5. Migration de substances solubles et non solubles
- 11.6. Hydromorphie
- 11.7. Halomorphie; sols salins et sols à alcalis.
- 11.8. Autres processus, le remaniement des sols.

Chapitre 12. La classification des sols

- 12.1. Les unités de la classification
- 12.2. La classification française
Sols minéraux bruts ; sols peu évolués ; sols calcomagnésimorphes ; vertisols ; sols isohumiques ; sols à mull ; podzols et sols podzologiques ; sols fersiallitiques ; sols ferrallitiques ; sols halomorphes ; sols hydromorphes.
- 12.3. Autres classifications de sols tropicaux (belge, britannique, portugaise).
- 12.4. Classifications américaine et russe
- 12.5. Conclusion

Chapitre 13. La cartographie pédologique

- 13.1. Définition de la carte pédologique
- 13.2. Caractéristiques et types de carte
Echelles, précision, types, cartes issues des cartes pédologiques
- 13.3. Etablissement d'une carte pédologique
Documents à étudier ; facteurs de formation du sol ; photographies aériennes et leur utilisation
Etablissement des itinéraires et densité des observations
- 13.4. Utilités de la carte pédologique. Analyse précision
- 13.5. Bibliographie de la cinquième partie

SIXIEME PARTIE - Application de la pédologie au développement de l'agriculture en Afrique tropicale.

Introduction

Chapitre 14. La pédologie dans l'étude d'un plan de développement

14.1. Définition et processus d'étude d'un plan de développement

14.2. Plan national de développement agricole

14.3. Plan régional de développement agricole

Chapitre 15. La pédologie dans l'étude et la réalisation des projets de mise en valeur agricole

15.1. Place des actions agricoles dans le cadre du plan régional de développement

15.2. Définition d'un projet de mise en valeur agricole

15.3. Amélioration des techniques culturales sans modification de l'implantation des cultures.

15.4. Aménagement hydro-agricole

15.5. Modification de l'implantation des cultures

15.6. Introduction d'une culture nouvelle

15.7. Développement d'une culture

15.8. Augmentation de rendement d'une culture

15.9. Périmètre de colonisation

15.10. Contrôle de l'évolution des sols cultivés

15.11. Bibliographie

Index des matières

I N T R O D U C T I O N

L'ouvrage qui suit a été rédigé dans le but d'aider les ingénieurs et personnel supérieur d'encadrement travaillant en zones intertropicale et méditerranéenne à tirer le meilleur parti des nombreux travaux pédologiques qui ont été effectués dans un grand nombre de pays, africains, malgache, ou autres, situés dans ces zones.

La science pédologique a beaucoup évolué au cours des vingt-cinq dernières années dans cette partie du monde. Les cadres de cette jeune science établie primitivement pour les pays tempérés et sur des standards de ces pays, ont peu à peu éclaté. A mesure que progressaient nos connaissances, tant sur le terrain qu'au laboratoire, un réajustement constant s'est avéré nécessaire. Aussi, " suivre " la pédologie a représenté rapidement une entreprise difficile. En peu d'années, les modifications qui ont résulté des colloques, séminaires, réunions internationales de spécialistes de toutes sortes ont fait que les étudiants de pédologie ne reconnaissaient plus leur discipline après quelques années d'interruption. Le vocabulaire change, s'enrichit, s'alourdit; parfois, à la parution d'un livre nouveau, les interprétations qui paraissaient les plus solides sont remises en question; les classifications sont bouleversées de manière profonde.

Cependant, de même qu'on ne conçoit pas qu'un ingénieur des mines ignore la géologie et toutes les disciplines sur lesquelles elle s'appuie (minéralogie, pétrographie, tectonique, paléontologie, etc..), de même, de nos jours, la connaissance de la pédologie ne peut plus être ignorée des agronomes et d'une manière générale, de tous ceux qui ont à effectuer un travail relatif au sol. On aurait pu conseiller aux personnes intéressées de se reporter aux traités classiques. En fait ils existent, soit en langue française et sont signés AUBERT et BOULAIN, DEMOLON, DUCHAUFOUR, ERHART, MAIGNIEN, etc, soit en langue anglaise avec les traités de BEAR, BAVER, JACKSON, JOFFE, MOHR et VAN BAREN, ROBINSON, etc... Actuellement, les traités russes (RODE, VILENSKII) sont traduits en anglais et portés à la connaissance du public occidental.

Mais ces ouvrages sont souvent l'oeuvre de chercheurs ayant consacré leurs activités aux sols des pays tempérés; les sols tropicaux n'y occupent qu'une petite partie. Par ailleurs, les travaux effectués en zone ~~intertropicale~~ sont le fait de chercheurs et techniciens adonnés à des tâches débouchant directement sur un inventaire de plus en plus détaillé et complet des sols, en vue du développement des pays où ils travaillent. Bien peu d'entre eux ont eu, jusqu'à présent, le temps et l'occasion d'écrire les éléments du traité de pédologie tropicale, dont les ingénieurs chargés du développement auraient besoin. Cet ouvrage ne prétend pas y suppléer en quelques pages. Il fait largement appel aux traités classiques car, bien entendu, les fondements de la pédologie demeurent; mais aussi, à des articles et ouvrages les plus récents concernant les sols tropicaux et méditerranéens. De plus, cet ouvrage a été entièrement rédigé par des ingénieurs et pédologues ayant longuement travaillé dans les régions tropicales (G. BACHELIER, A. COMBEAU, B. DABIN, M. GUINARD, R. MAIGNIEN, M. SCHMID, P. SEGALEN, VERDIER) et qui ont pu de ce fait présenter, pour leurs collègues d'Outre-Mer, quelques points qui leur paraissent essentiels sur les sols tropicaux et dont certains sont originaux.

L'ouvrage se compose de deux sections. La première est consacrée à un rappel des notions de pédologie. Le deuxième traite de l'application de la pédologie au développement de l'agriculture en Afrique tropicale.

La première section comprend treize chapitres répartis en cinq parties.

Dans la première partie, on essaie de définir schématiquement les caractéristiques des zones méditerranéenne et intertropicale, essentiellement en fonction des facteurs de formation du sol. Quatre milieux ont été définis : méditerranéen, désertique, tropical et équatorial. Ils occupent chacun une aire géographique déterminée et correspondent à une ou plusieurs pédogénèses spécifiques.

La seconde partie est consacrée aux définitions du sol et à ses constituants. La définition du sol et de ses horizons a fait l'objet de discussions de récentes commissions. Une référence est faite à la nomenclature de quelques horizons particuliers utilisés tant en France qu'aux U.S.A. Les constituants organiques et minéraux sont également passés en revue, avec un accent tout particulier sur les constituants des sols tropicaux.

La troisième partie concerne la caractérisation des sols sur le terrain et au laboratoire. Les principales données que l'on doit mesurer ou apprécier dans la description d'un profil sont passées en revue, ainsi que les caractéristiques physiques, chimiques et biologiques.

La quatrième partie est relative aux rapports entre les sols et la végétation naturelle et la végétation cultivée. Les données d'interprétation de la fertilité sont passées en revue.

Dans la cinquième partie on examine les principaux processus de formation du sol, les grandes classifications des sols (une importance particulière est accordée à la classification française), la cartographie pédologique.

La deuxième section comprend une partie divisée en deux chapitres et une introduction.

L'introduction définit les méthodes générales de la pédologie appliquée.

Le premier chapitre est consacré aux études de pédologie appliquée pour la préparation des plans de développement.

Le deuxième chapitre traite des objectifs et des méthodes des études pédologiques dans la préparation des projets de mise en valeur agricole; il y est traité également du contrôle de l'évolution des sols cultivés.

A la fin de chaque section, une bibliographie sommaire est fournie. Les grands traités classiques auxquels il a été largement fait appel sont indiqués ainsi qu'un certain nombre d'articles ou d'ouvrages auxquels le lecteur à la recherche de données complémentaires pourra se référer. En aucun cas, cette bibliographie ne doit être considérée comme exhaustive.

C h a p i t r e 1

GENERALITES SUR LES ZONES INTERTROPICALE ET MEDITERRANEENNE

- 1.1. GENERALITES
- 1.2. LE MILIEU EQUATORIAL
- 1.3. LE MILIEU TROPICAL
- 1.4. LE MILIEU DESERTIQUE
- 1.5. LE MILIEU MEDITERRANEEN
- 1.6. CONCLUSION
- 1.7. BIBLIOGRAPHIE

1.1.- GENERALITES

Il est un peu ambitieux de vouloir définir en quelques mots les facteurs de formation du sol dans un ensemble géographique aussi vaste que celui qui a été envisagé plus haut. On peut cependant tenter de mettre en lumière les points communs et les différences essentielles qui existent en ce qui concerne le climat, la végétation, les roches-mères, la géomorphologie et le peuplement humain, dans la portion du globe envisagée.

La formation du sol est avant tout sous la dépendance des facteurs climatiques et plus particulièrement de la pluie et de la température qui sont responsables de l'hydrolyse, de l'oxydation, de la dissolution dans les roches qui donnent naissance aux sols. Les climats sont déterminés avec beaucoup de régularité par la faible inclinaison des rayons solaires par rapport à la surface de la terre, par la faible différence entre la longueur du jour et de la nuit.

La répartition de la quantité de chaleur reçue sur le globe détermine celle des pressions atmosphériques : basses pressions à proximité de l'équateur, hautes pressions aux tropiques, dont les différences, jointes à la rotation de la terre, régissent les mouvements des masses d'air et le régime pluviométrique. Au voisinage de l'équateur, les pluies sont les plus abondantes et elles diminuent à mesure qu'on se

rapprache des tropiques pour devenir quasi-nulles au niveau de ces lignes et augmenter de nouveau lorsqu'on s'éloigne de celles-ci.

Au voisinage de l'équateur, les températures sont élevées mais varient pas ou peu au cours de l'année. A mesure qu'on s'approche des tropiques, l'amplitude annuelle augmente. Dans la zone intertropicale, l'amplitude diurne est supérieure à l'amplitude annuelle. Lorsque cette dernière dépasse la première, on considère que l'on a quitté la zone intertropicale où les saisons sont fondées sur les variations pluviométriques pour entrer dans la zone de climat méditerranéen, où dans les distinctions saisonnières intervient la température.

Dans ce grand ensemble géographique, on peut donc distinguer une première zone où les variations annuelles de température ramenées au niveau de la mer sont supérieures aux amplitudes diurnes. Dans ce cas, la différenciation saisonnière est fondée autant sur la température que sur la pluviosité (modérée) et sa répartition. C'est le milieu méditerranéen.

Dans un autre ensemble, les variations annuelles de la température sont inférieures aux variations diurnes. Les différenciations climatiques seront alors fondées surtout sur la pluviométrie. Dans une première zone, la pluviométrie est très faible et très irrégulière et correspond au milieu désertique.(*) Dans la deuxième, la pluie tombe en une seule saison plus ou moins longue, tandis qu'une saison sèche plus ou moins importante sépare les saisons des pluies. C'est le milieu tropical. Dans une troisième, il n'y a pas de véritable saison sèche qui soit supérieure à deux mois. Il peut y avoir deux saisons des pluies et deux courtes interruptions ou bien une seule saison où la pluie tombe de manière importante et plus ou moins régulière. C'est le milieu équatorial.

PEGUY (1961) propose de classer les climats d'après l'emploi de climogrammes qui permettent de classer les mois en : tropicaux (chauds et humides), arides (chauds et secs), tempérés (humides et frais).

(*) Il ne sera question ici que des déserts chauds et il ne sera pas fait référence aux déserts froids (d'Asie par exemple)

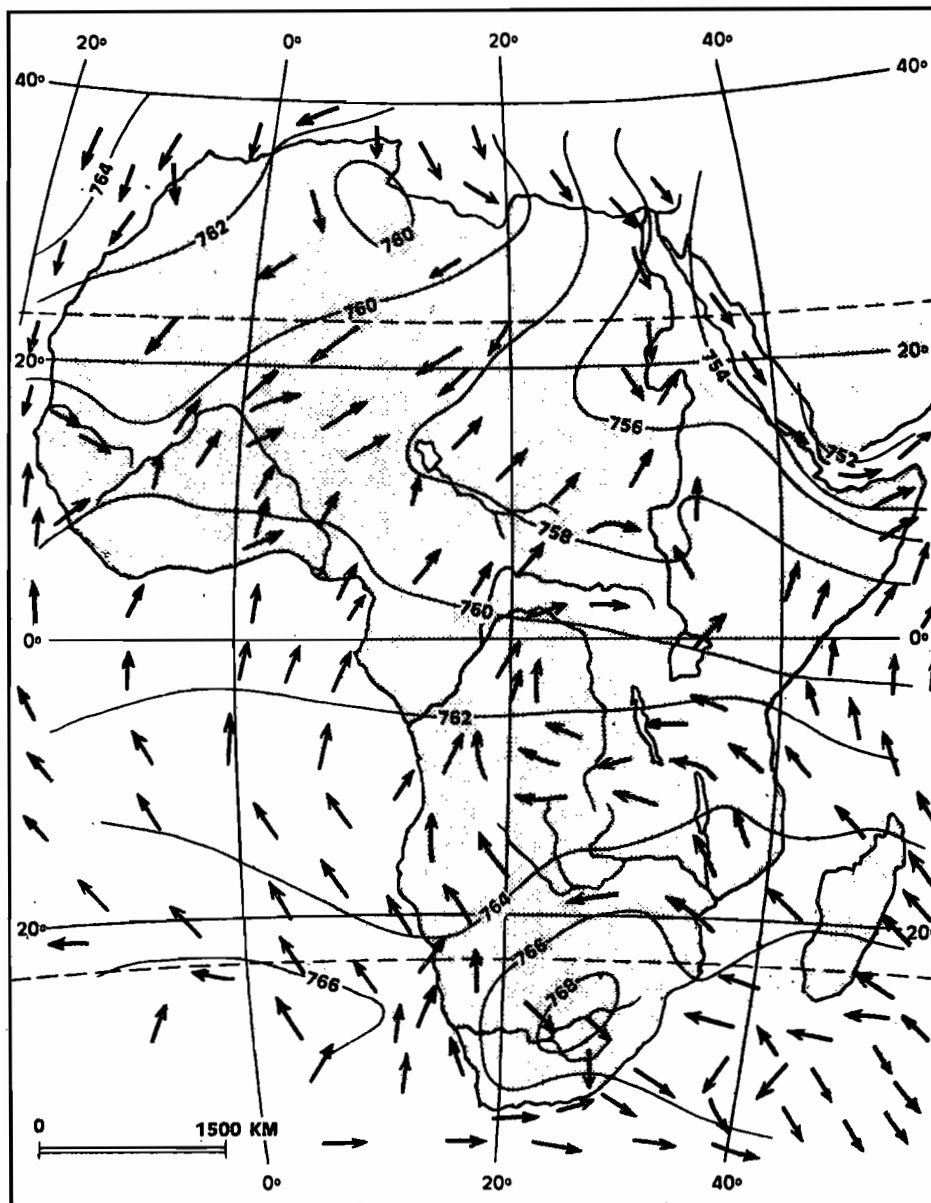


Fig. 1 — RÉGIME DES VENTS EN JUILLET _ PRESSION BAROMETRIQUE
d'après Robert (Le Congo Physique)

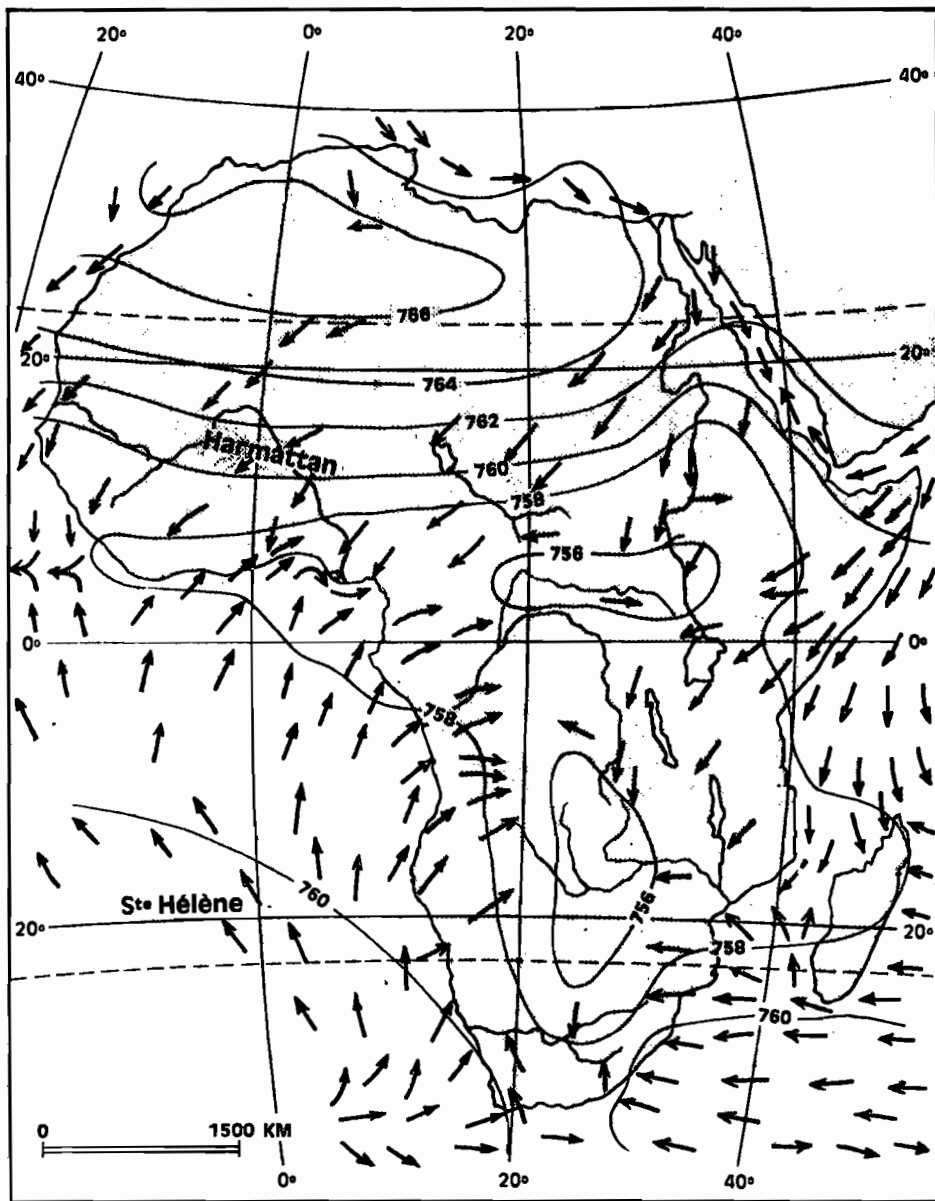


Fig. 2 — RÉGIME DES VENTS EN JANVIER .PRESSION BAROMÉTRIQUE
d'après Robert (Le Congo Physique)

Le climat méditerranéen n'a pas de mois tropical, mais un nombre variable de mois arides et tempérés. Le climat désertique (+) n'a qu'un très petit nombre de mois tropicaux (1 à 2), un très grand nombre de mois arides (8 à 10) et 1 ou 2 mois tempérés. Le climat tropical est caractérisé par l'absence de mois tempérés et un nombre équilibré de mois tropicaux et arides . Le climat équatorial a un nombre très élevé de mois tropicaux, un ou deux arides, et pas de mois tempérés.

Connaissant les pluviométries et les températures mensuelles des stations, il est facile d'avoir une classification simple et rapide des climats .

La végétation suit de très près les modifications du climat. Dans la plupart des cas, le type en équilibre avec l'environnement est un peuplement arboré dont les caractéristiques varient avec la pluviométrie et la répartition de celle-ci au cours de l'année. On passe de la forêt dense ombrophile à la forêt dense décidue, à la forêt sèche, au fourré à épineux pour voir disparaître la végétation dans les déserts. En zone méditerranéenne, un nouveau type de forêt apparaît .

La présence de l'homme et de ses troupeaux est une cause constante de dégradation des formations arborées qui sont modifiées ou détruites et très souvent remplacées par des peuplements variés où dominent les plantes herbacées, savanes et steppes dans la zone intertropicale, maquis, garrigues, steppes en zone méditerranéenne. Un facteur non spécifiquement climatique comme une nappe phréatique haute, la présence d'une cuirasse ou de dunes, peuvent amener des modifications locales dans la composition floristique et l'aspect de la végétation.

Il n'y a pas de raison, à priori, pour que les zones inter-tropicale et méditerranéenne correspondent à un type de roche-mère particulier . Pourtant il en est bien ainsi . Sur des étendues considérables en Afrique, en Amérique du Sud, en Inde, à Madagascar, le socle ancien affleure. Il s'agit de granites, roches métamorphiques variées comprenant des séries sédimentaires précambriennes métamorphisées. A ces roches cristallines sont associées : des roches volcaniques basiques qui couvrent de très vastes étendues en Afrique Centrale et Orientale, au Brésil, en Inde etc...; des roches sédimen-

taires détritiques d'origine continentale, sables, grès, argilites, qui proviennent de la destruction des roches cristallines précédentes. Toutes ces roches constituent ce que les géologues associent au terme de " vieux boucliers " rigides, non plissés, souvent fracturés, parfois recouverts de roches détritiques d'origine continentale, rarement marine.

Les zones plissées où dominent les sédiments d'origine marine se situent à la limite extérieure de ces boucliers (Himalaya aux Indes, Atlas en Afrique, Andes en Amérique). Les roches sont alors essentiellement calcaires, en association étroite avec des roches volcaniques le plus souvent basiques. Les divers archipels, les îles du Pacifique, ainsi que les Antilles ont une constitution à la fois calcaire et volcanique. Enfin, il faut signaler que, parfois, sur la bordure des continents, existent des sédiments marins, à dominance calcaire, mais non plissés.

Cette opposition entre les roches-mères va se retrouver dans la géomorphologie. En effet, on peut distinguer deux types fondamentaux : les zones d'aplanissement et les zones plissées. Une caractéristique commune à la grande masse africaine, la partie orientale de l'Amérique du Sud (Guyanes, Brésil), à l'Inde péninsulaire, l'Australie, etc... est de présenter une succession de vastes zones planes où les différences d'altitude sont très faibles mais séparées par des escarpements souvent importants. Ces surfaces ont été aplanies au cours des âges et on a pu, dans un certain nombre de cas, proposer une datation pour la plupart d'entre elles . Si l'ensemble de la surface est plan, on peut observer dans le détail des différences assez sensibles. Dans les régions équatoriales et tropicales humides, on observe une succession de petites collines à pentes fortes et versants convexes. Par contre, dans les zones tropicales sèches et sub-désertiques, on peut observer des surfaces planes cuirassées ou non, des massifs isolés qui sont flanqués de versants concaves s'achevant par des formes à pente douce et relativement plats (glacis).

En Amérique centrale, dans la chaîne andine, en Afrique du Nord, en Asie du Sud-Est, en Indonésie, des plissements récents, accompagnés d'épanchements volcaniques importants ont donné naissance à des reliefs plus accidentés, où la topographie le drainage présentent des caractéristiques très différentes.

Cet ensemble de facteurs est responsable de la formation des sols, mais c'est bien entendu le climat qui est le plus efficace et c'est lui qui sert de base à la différenciation des quatre milieux qui vont être précisés ci-après. Mais, dans ces quatre milieux, le facteur temps a été particulièrement important. Avec des vicissitudes diverses, la pédogénèse a pu s'exercer souvent pendant des millions d'années.

2. - LE MILIEU EQUATORIAL

Le climat équatorial est essentiellement sous la dépendance de la pluie et de sa répartition. Au voisinage de l'équateur, les variations entre la longueur du jour et de la nuit sont nulles ou très faibles; c'est également là que les rayons du soleil s'écartent le moins de la normale; c'est au voisinage de l'équateur que le soleil passe deux fois au zénith chaque année. Toutes les conditions sont donc réunies pour que la quantité de chaleur reçue soit la plus élevée. Il s'ensuit que cette zone est, du fait de son échauffement permanent, une zone de basse pression vers laquelle convergent les vents de grande régularité en provenance des régions situées au Nord et au Sud. Il en résulte d'abondantes pluies de convection. Cette zone de basse pression et de pluies abondantes balaie deux fois par an la zone équatoriale qui est définie en principe par une humidité permanente, mais cependant variable : deux saisons, de pluies souvent très longues, peuvent être distinguées séparées par deux très courtes saisons relativement sèches.

Lorsque des reliefs importants existent, ils déterminent une élévation des masses d'air humides et provoquent des précipitations en toutes saisons. C'est le cas au sud du Cameroun et de la Nigéria où la masse du Mont Cameroun est sans doute responsable dans cette région d'une forte pluviosité avec une absence

de saison sèche. C'est également le cas dans un certain nombre d'îles du Pacifique.

Dans le voisinage de l'équateur, on a donc un régime pluviométrique caractérisé soit par l'absence de saison sèche ou bien par deux courtes saisons sèches qui ne dépassent pas deux mois au total. Les précipitations sont élevées et dépassent le plus souvent 2.000 mm. La pluviométrie est donc élevée; il en est de même de l'humidité de l'atmosphère. Il s'ensuit que la température n'est jamais très forte (23 à 26°) et que ses variations diurnes et saisonnières sont modestes. Une variation d'altitude modérée ne modifie pas de manière fondamentale le régime climatique. La répartition de la pluviométrie n'est guère perturbée tandis que la température s'abaisse de quelques degrés et que la variation diurne s'accroît légèrement.

Les climatologues ont proposé pour les climats ressortissant du régime équatorial des noms divers dont les plus usuels sont : congolais, camerounien, indonésien, mais ils présentent tous les caractéristiques générales précisées plus haut.

La végétation dans la zone équatoriale est essentiellement la forêt ombrophile ou forêt dense humide. Il s'agit d'un peuplement dense, fermé, d'arbres et d'arbustes atteignant des hauteurs diverses. On trouve au sol des plantes suffrutescentes, des plantes herbacées à larges feuilles; les graminées y sont rares. Les arbres ont des troncs le plus souvent très droits; la base est renforcée par des contreforts; le houppier se rassemble au sommet d'un fût de plusieurs dizaines de mètres.

Dans les zones marécageuses, les espèces adaptées à une vie aquatique se développent. En bordure de mer, les palétuviers constituent un peuplement spécial : la mangrove, qui remonte le long des estuaires. En altitude, la forêt dense se modifie quelque peu. La hauteur des arbres diminue. Les troncs se couvrent de mousses et lichens épiphytes.

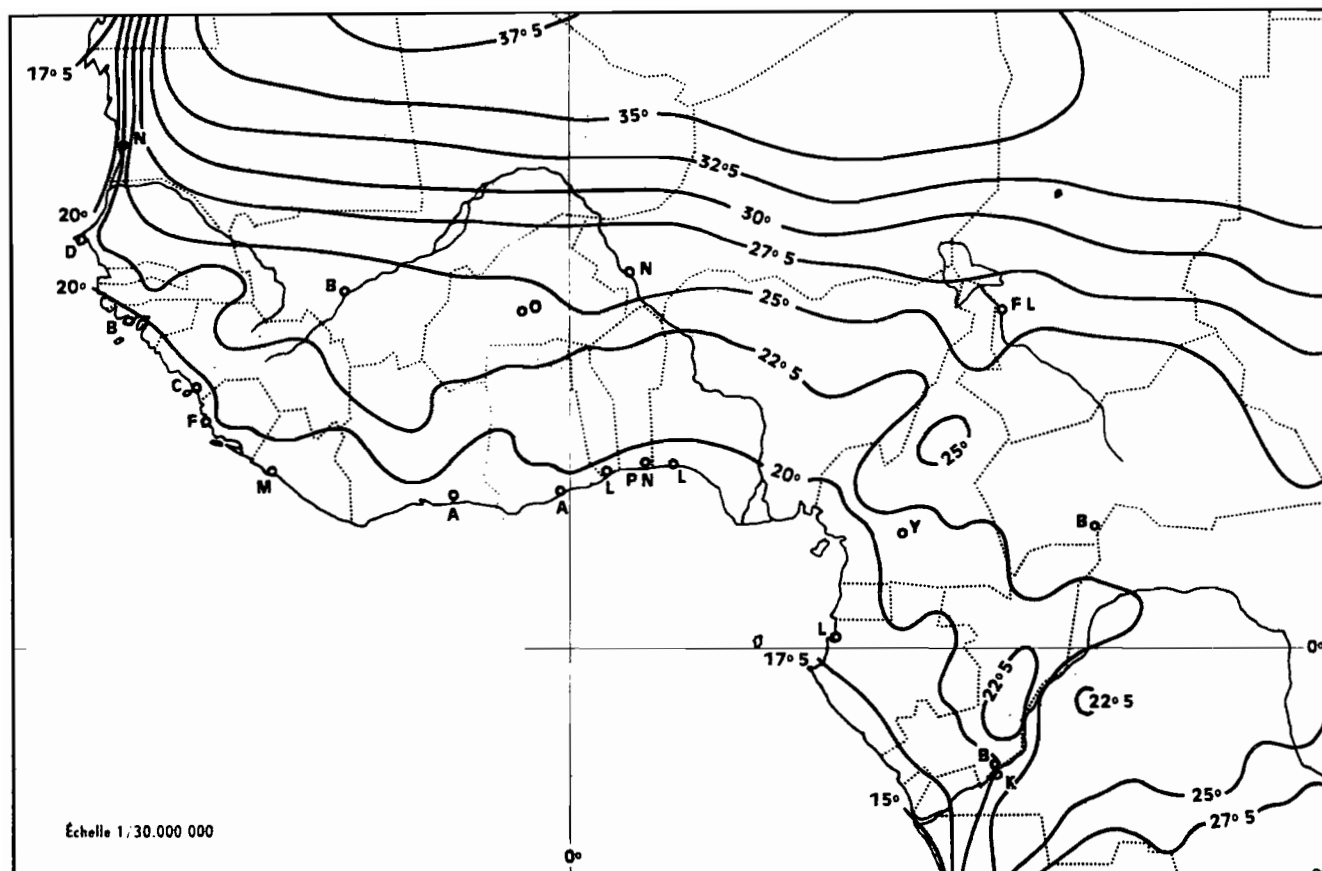


Fig. 3 — TEMPÉRATURES MAXIMA EN JUILLET (d'après l'Atlas Climatologique de l'Afrique)

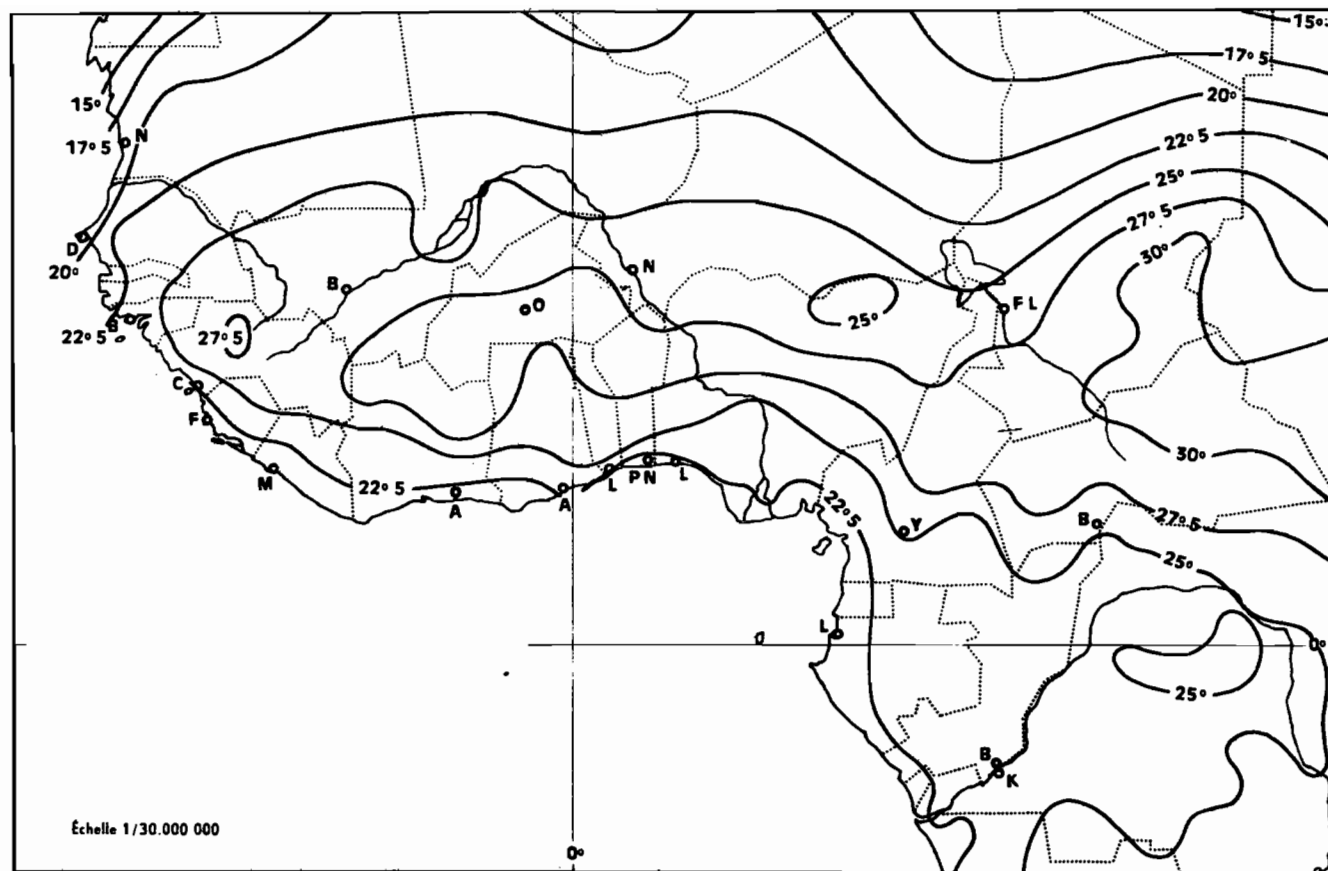


Fig. 4 — TEMPÉRATURES MAXIMA EN JANVIER (d'après l'Atlas Climatologique de l'Afrique)

La destruction de cette forêt par l'homme n'est pas irrémédiable. Des espèces arborées, dites de lumière, comme le parasolier (1), occupent rapidement les zones déforestées et préparent le retour des grands arbres. Ce n'est que dans des cas assez particuliers comme lorsque le sol est très pauvre (cas de cuirasses, de sables, etc.....) que la réoccupation du milieu par la forêt est très difficile et que la savane secondaire peut se maintenir.

Les roches-mères peuvent appartenir à toutes les catégories connues : roches plutoniques, métamorphiques, sédimentaires et volcaniques. Si les granites, gneiss et schistes sont particulièrement abondants, il faut signaler en Afrique Centrale l'existence de puissantes séries sédimentaires quasi-horizontales et datées du précambrien (schisto-calcaire, schisto-gréseux, argilites, etc..) Près des côtes, il y a lieu de signaler un développement de séries sédimentaires variées, datées du crétacé et des périodes suivantes et représentées par des marnes, argiles, calcaires, sables et grès, etc.... ceci particulièrement au Gabon, Congo, au sud du Cameroun et de la Côte d'Ivoire .

La géomorphologie est très variable. La topographie d'ensemble est relativement plane comme dans les Guyanes, le sud de la Côte d'Ivoire, le Cameroun et le Congo, mais le relief de détail est constitué d'une multitude de petites collines aux versants convexes. En Afrique, la zone plissée du Mayombe constitue une exception, ainsi que la zone volcanique du Cameroun méridional .

Dans l'Amérique centrale et méridionale, de puissantes orogénèses intéressent tous les pays bordant l'Océan Pacifique .

La zone équatoriale est, d'une manière générale, relativement peu peuplée. Les sols soumis à une forte pluviométrie, sous une température élevée, présentent une fertilité réduite. L'ensoleillement est faible; l'humidité est favorable à une variété de maladies cryptogamiques des cultures. L'homme lui-même est sujet à toutes sortes de maladies parasitaires ou microbiennes contre lesquelles on ne lutte efficacement que depuis peu. Il en est de même pour le bétail. Il s'ensuit que le développement agricole est assez limité dans cette zone, surtout si des ressources industrielles ou minières attirent les populations naturellement clair-

(1) *Misanga cecrepioides* .

semées. Une exception est constituée par la zone volcanique du Mungo au Cameroun où des sols d'une richesse très élevée sont activement mis en valeur .

3. LE MILIEU TROPICAL.

Dans la zone tropicale, on voit apparaître une saison sèche dont la longueur est suffisante pour avoir une influence sur la végétation ainsi que sur le sol . Cette zone est située de part et d'autre de l'équateur. L'écart entre la longueur du jour et de la nuit s'accroît; le soleil passe au zénith deux fois par an, mais les passages sont relativement proches et leurs effets ne se dissocient pas. La zone tropicale est intéressée par le passage de vents réguliers, soit chargés d'humidité comme l'alizé ou la mousson, soit secs comme l'harmattan.

Le climat tropical est donc caractérisé par deux saisons très distinctes : une saison humide correspondant aux passages du soleil au zénith et une saison sèche pendant laquelle le soleil culmine dans l'hémisphère opposé. Les précipitations sont violentes et concentrées en quelques mois. Elles varient entre 5 m et 0,5 m, mais les pluviosités très élevées sont exceptionnelles (Conakry); le plus souvent, elles sont inférieures à 1,500 mm. La longueur de la saison des pluies varie de 8 à 2 mois .

La température augmente notablement. La moyenne annuelle peut atteindre 28°. L'écart diurne, ainsi que la variation saisonnière, sont nettement plus importants qu'en milieu équatorial. On peut observer deux maxima, l'un au début, l'autre à la fin de la saison des pluies.

Différents types de climats tropicaux ont été distingués par les climatologues. Parmi les plus connus, on peut citer :
Climat guinéen : 4-5 mois arides et 8-7 mois tropicaux
Climat soudanien : 6-5 mois arides et 6 mois tropicaux
Climat sahélien : 7-10 mois arides et 2-5 mois tropicaux .

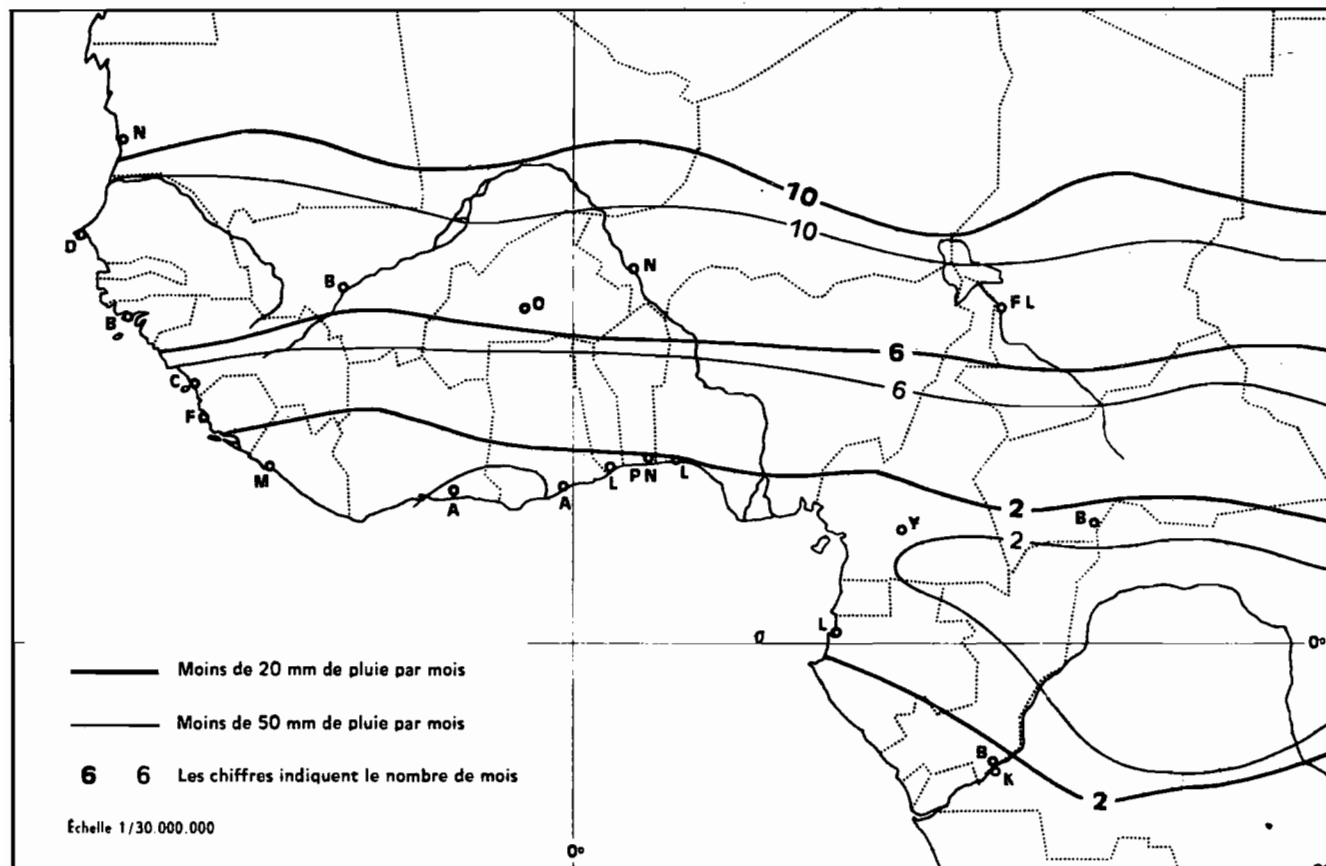


Fig. 5 — DUREE DES SAISONS SECHES (d'après le Professeur S. P. Jackson)

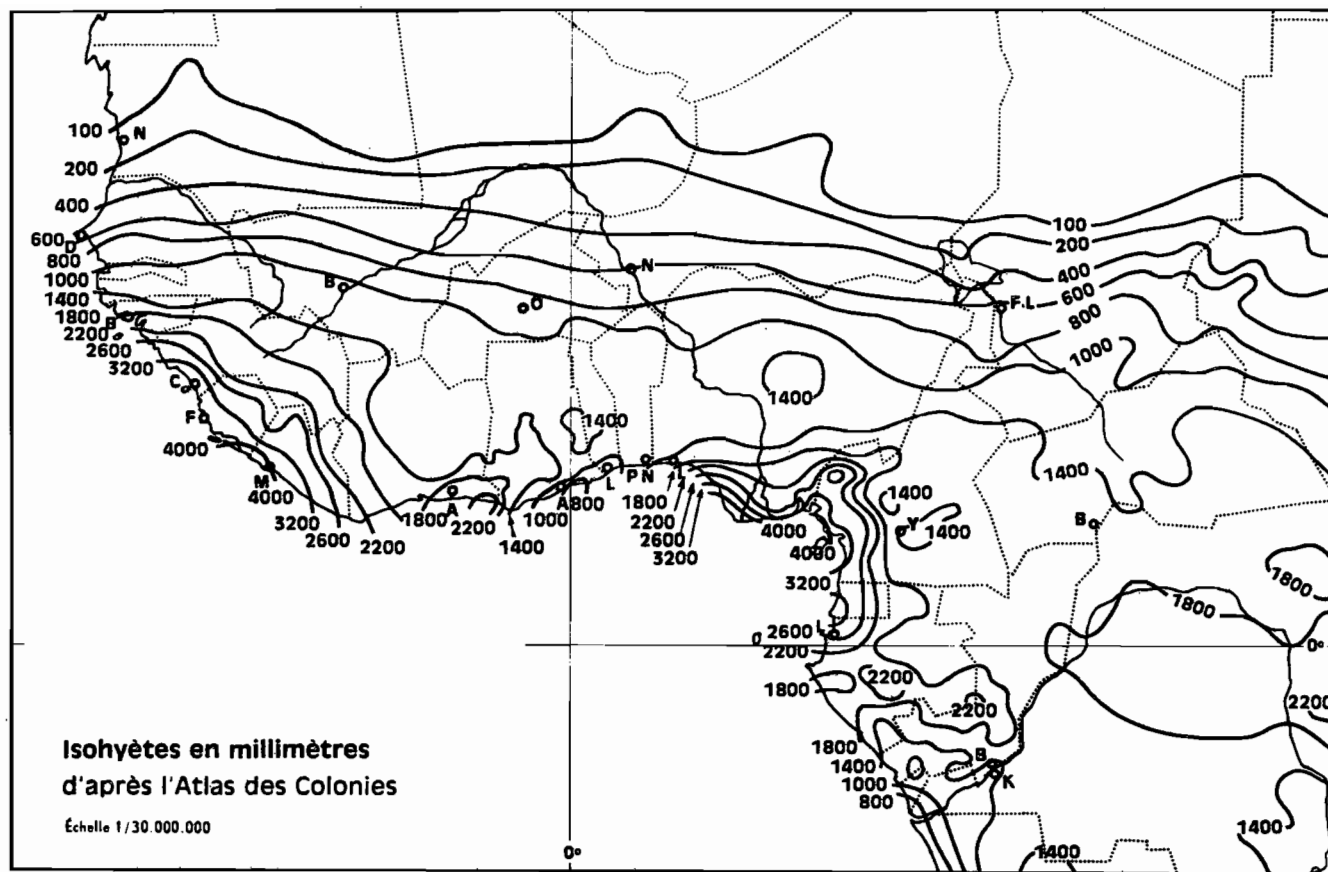


Fig. 6 — PLUVIOMÉTRIE TOTALE ANNUELLE DE L'AFRIQUE CENTRALE ET OCCIDENTALE

Il va de soi que l'altitude peut également influencer les climats tropicaux en abaissant notablement la température moyenne. C'est le cas sur les hauts plateaux malgaches, au centre du Cameroun, en Guinée, etc

La végétation primaire de la zone tropicale est encore la forêt, mais d'un type nettement différent de celui de la zone précédente. Il s'agit de la forêt dense sèche (ou décidue) qui réalise un peuplement fermé avec des arbres et arbustes atteignant diverses hauteurs, mais dont la taille est nettement moins forte qu'en zone équatoriale. Le port des arbres est moins droit. La plupart des espèces perdent leurs feuilles une partie de l'année. Il en est de même des arbustes du sous-bois. Les graminées apparaissant sur le sol en touffes discontinues. A cette forêt sont associés d'autres types : la forêt rizicole près des cours d'eau, la mangrove en bordure des océans .

Cette forêt est relativement fragile et a disparu sur d'immenses espaces en Afrique. Elle est cependant connue en République Centrafricaine, à Madagascar, en Amérique du Sud, etc... La dégradation de cette forêt par la hache des cultivateurs, ou bien par le feu aboutit à des formations mixtes arborées arbustives et graminéennes dont la savane et la steppe sont les plus connues .

La savane est une formation herbeuse comportant un tapis de graminées de 80 cm de haut, associées ou non à des arbres ou arbustes de taille variée. Les graminées brûlent régulièrement une ou plusieurs fois par an. Elles ne sont comestibles par le bétail que peu de mois par an, ce qui détermine les pasteurs à s'en débarrasser dès qu'elles sont grandes .

A la limite de la zone tropicale et de la zone désertique, la savane est peu à peu remplacée par la steppe qui est une formation herbeuse ouverte, comportant des touffes disséminées et espacées de graminées accompagnées ou non de plantes ligneuses souvent épineuses. Les graminées n'ont pas 80 cm de hauteur, elles sont accompagnées de plantes annuelles qui ne durent qu'une partie de l'année. La steppe peut être arborée, arbustive, buissonnante, succulente ou simplement graminéenne. Cette steppe

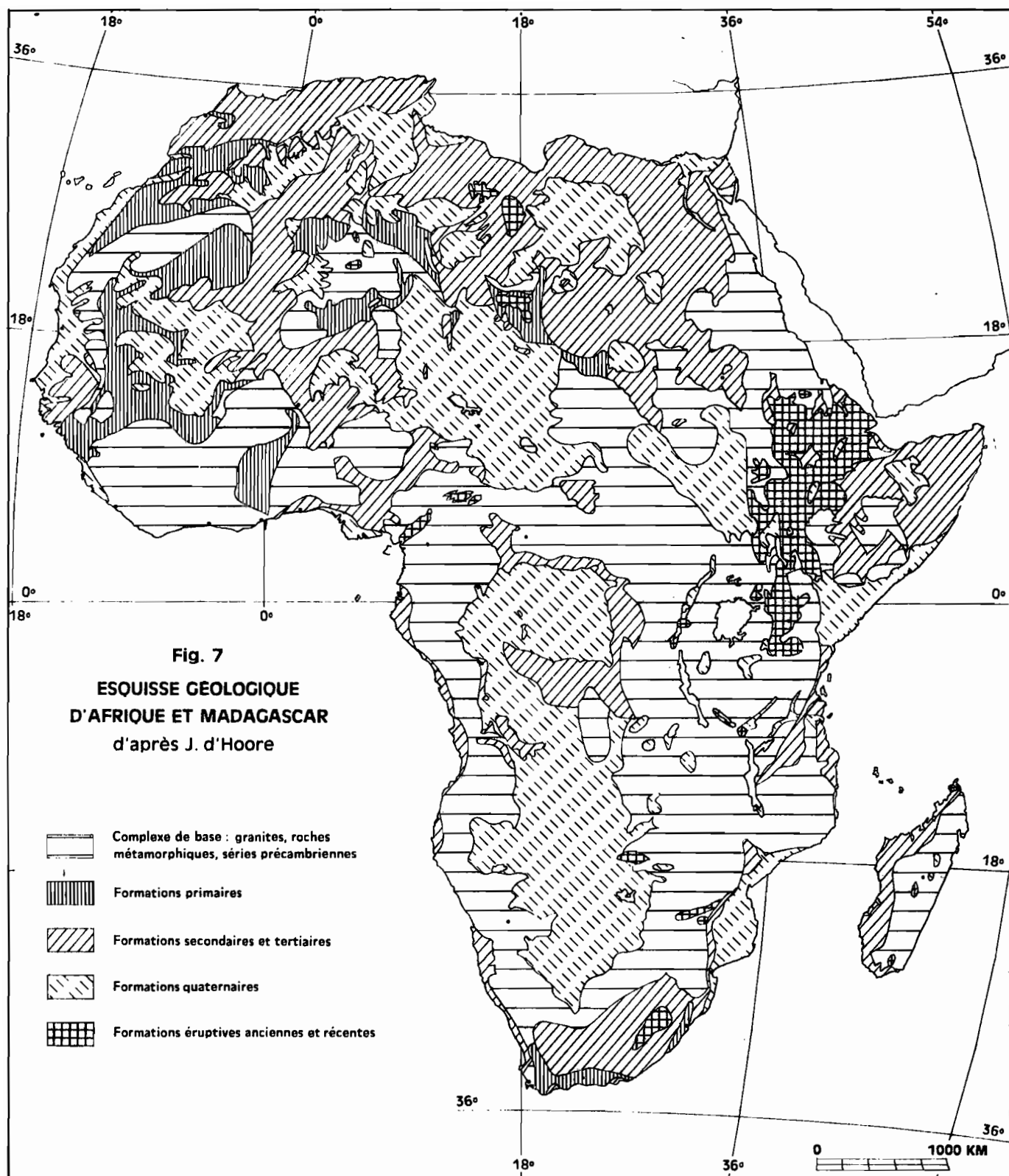
résulte de la dégradation des formations végétales antérieures par l'homme et ses troupeaux. L'espacement des touffes de graminées en fait un combustible difficile. Par contre, l'abondance des chèvres, moutons, boeufs et chameaux contribue certainement pour beaucoup à l'état actuel de la végétation.

Les roches-mères semblent moins variées que dans la zone équatoriale. Les roches du socle apparaissent près de la surface sur d'immenses étendues à travers l'Afrique occidentale et centrale. Il en est de même au Brésil, aux Indes, etc.... Les roches sédimentaires sont le plus souvent des roches détritiques d'origine continentale provenant de la destruction par érosion des roches et des sols. Aussi aux granites, aux séries métamorphiques du précambrien seront associés des grès, sables, argilites ("Continental terminal", "Continental intercalaire", "grès de Nubie", "sables du Kalahari", "grès de Carnot", etc....).

La géomorphologie prend dans cette zone et particulièrement en Afrique, un aspect caractéristique. De vastes plateaux, horizontaux ou subhorizontaux, entourés de glacis souvent étendus alternent avec des zones déprimées où la circulation de l'eau est parfois difficile et où l'évaporation joue un grand rôle.

Les grands plateaux sont situés à des altitudes variables de 500 à 1500 m (Guinée, Nigéria, Cameroun, République Centrafricaine, Congo-Kinshasa, Afrique orientale et méridionale, etc.) Ces plateaux se retrouvent en Inde, au Brésil. Ils résultent de l'érosion du continent au cours de longues périodes, surtout depuis le milieu du secondaire. A ces plateaux correspondent des zones déprimées, sans exutoire vers la mer comme la cuvette tchadienne, ou avec exutoire comme le delta central nigérien au Mali, le Bahr-el-Ghazal au Soudan, etc....

La morphologie de détail est constituée de grands pans faiblement inclinés où le drainage est le plus souvent assez médiocre. Mais il existe également en zone tropicale, des zones plissées à relief très accentué, en Amérique du Sud (Pérou, Equateur), au Mexique, etc



Les sols de cet ensemble comportent des variétés assez grandes: sols ferrallitiques dans les parties les plus humides, ailleurs sols ferrugineux tropicaux, vertisols, sols hydromorphes et sols halomorphes .

C'est dans cette zone que se rencontrent les densités de population les plus fortes de la zone intertropicale. Les plateaux élevés (Madagascar, Cameroun, Guinée, etc...) sont favorables à la santé des hommes et l'absence de glossines permet le développement du bétail. Certaines régions volcaniques, par la qualité de leurs sols, sont également favorables à l'agriculture (Ouest du Cameroun, Brésil); des plaines alluviales par la richesse de leurs sols, les possibilités d'irrigation permettent des cultures intensives de riz, de canne à sucre (Extrême-Orient, Madagascar, Mozambique etc....) Ailleurs peuvent exister des zones très faiblement occupées (moins de 1 habitant au kilomètre carré).

Les zones sèches, sous climat sahélien en particulier, se prêtent au développement des grands troupeaux de boeufs ou de chameaux .

4.- LE MILIEU DESERTIQUE

Il est situé géographiquement à proximité des tropiques soit dans l'hémisphère Nord (Sahara, Arabie, Sonora au Mexique, Vallée de l'Indus), soit dans l'hémisphère Sud (Kalahari, Namaqualand en Afrique: Chaco, côte du Chili septentrional, en Amérique; Australie).

Du point-de-vue climatique, ces régions constituent des zones de haute pression quasi-permanente d'où partent des vents secs soit en direction de l'équateur, soit en direction de la zone méditerranéenne. La pluviométrie est très réduite; elle est inférieure à 150 mm et elle tombe avec beaucoup d'irrégularité et une violence extrême. La température moyenne annuelle est encore élevée mais les écarts diurnes augmentent considérablement et peuvent atteindre 30 à 40°. L'écart saisonnier est déjà accusé (20° environ au Sahara). Un élément important de la climatologie

est le vent qui, en l'absence de couverture végétale importante, laisse roches et sols sous l'action directe de l'érosion. La déflation éolienne est importante et tous les éléments meubles de petite taille sont sans cesse déplacés ou remaniés tandis que les parties grossières sont soumises à l'usure par les matériaux transportés par le vent. C'est la corrasion.

L'absence de pluviométrie s'accompagne d'une réduction considérable de la végétation qui finit par disparaître sur d'immenses étendues. Seules les zones correspondant à des circulations occasionnelles d'eau sont un peu plus favorisées.

Les végétaux qui se développent ont des caractéristiques particulières qui leur permettent de résister aux conditions très spéciales du milieu désertique: réduction des feuilles et développement des épines; développement de réserves dans les feuilles charnues; développement du système racinaire qui va chercher au loin l'eau nécessaire à la survie; durée très courte du cycle biologique, etc ...

Les arbres sont très rares, seuls des arbustes et arbrisseaux peuvent se développer avec quelques plantes herbacées. Le sol n'est pratiquement jamais couvert et la rareté des végétaux n'offre pratiquement aucune défense à l'érosion éolienne.

Les roches sont les mêmes que précédemment. Il faut signaler cependant au Sahara des zones d'une certaine étendue occupées par des roches volcaniques (Hoggar, Tibesti) et surtout l'abondance des sables sans cesse déplacés par le vent qui couvrent de très vastes surfaces.

Du point de vue géomorphologique, dans le milieu désertique, l'action de la pluie a un effet très brutal et est responsable d'érosion et d'accumulation particulières, en raison de la rareté du sol et de la végétation. Par ailleurs, l'action du vent prend une importance considérable. En zone de roche dure, on observe fréquemment des inselbergs entourés de pédiments. Lorsque la roche est tendre ou lorsqu'il y a alternance de roches dures et tendres, on assiste alors à la formation de glacis portant ou non des matériaux meubles résultant de l'érosion.

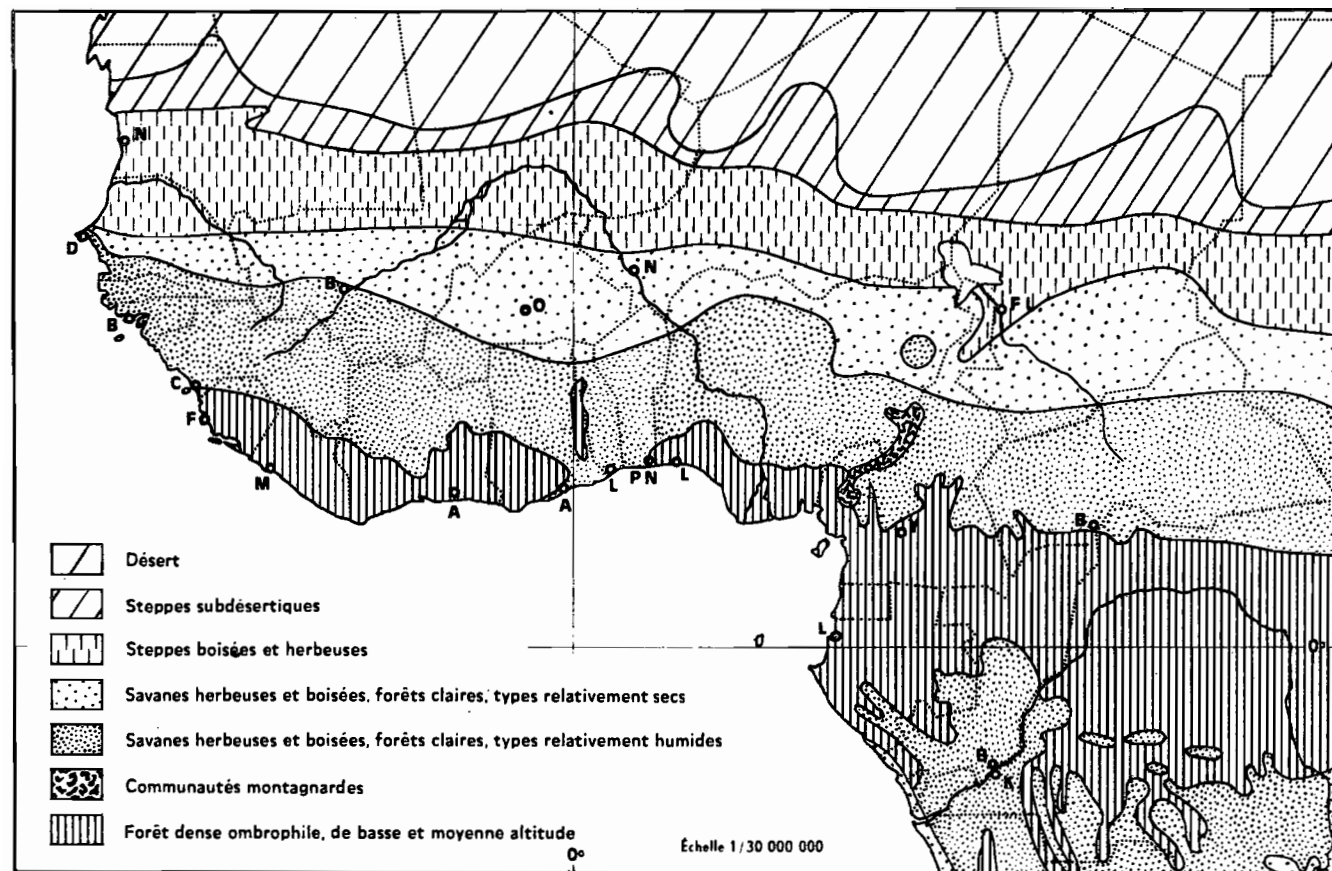


Fig. 8 LA VÉGÉTATION EN AFRIQUE OCCIDENTALE ET CENTRALE (d'après A.E.T.F.A.T. 1959)

Aux zones précédentes sont associées des zones planes ou déprimées où s'accumulent des débris de taille variée: grossiers ou fins. Ces dépressions portent des noms variés et sont associées très souvent à des accumulations de sels (chlorures, sulfates ou carbonates).

Là où l'accumulation éolienne est prépondérante, s'établissent des formes de relief très spéciales pour lesquelles un vocabulaire très varié a été établi . Une dune constitue un monticule de sable de plusieurs dizaines de mètres de haut. Lorsqu'elle n'a que quelques mètres de hauteur et présente la forme d'un croissant, il s'agit d'une barkhane. Un erg est une zone complètement occupée par des dunes. Un hammada est un plateau essentiellement caillouteux. Un reg désigne une surface dure où la déflation éolienne a enlevé les parties fines et laissé sur place les cailloux. Un sebkha est une lagune temporaire plus ou moins fortement salée.

En raison de l'absence d'eau, de végétation, le milieu désertique est tout à fait impropre au développement de sols. L'altération chimique est très réduite et les actions mécaniques sont particulièrement violentes. Il peut arriver, toutefois, que l'on puisse observer des sols fossiles. Ceux qu'on observe sont des sols minéraux bruts et parfois des sols peu évolués où les teneurs en argile sont très faibles. Les vertisols et sols rouges qu'on peut occasionnellement rencontrer sont hérités de périodes antérieures plus humides .

Malgré les conditions de vie très difficiles, les déserts ne sont pas totalement inhabités. L'agriculture est possible lorsqu'il y a de l'eau (oasis du Sahara, irrigations par rivières provenant de zones humides). Le reste du territoire est parcouru par des troupeaux, s'accommodant des conditions de ce milieu si particulier .

5.- LE MILIEU MEDITERRANEEN.

Si de très grandes variétés peuvent être discernées dans le monde intertropical et dans les trois milieux qui ont été distingués à l'intérieur de celui-ci, il en est de même pour la zone méditerranéenne. Il est très difficile d'établir une unité dans

aucun des domaines du climat, des roches-mères, de la végétation, des sols, ni encore moins du peuplement humain .

Le climat peut être défini dans le pourtour de la Méditerranée par des hivers frais et pluvieux et par un été chaud et sec. La pluviométrie est le plus souvent comprise entre 400 et 800 mm. La température moyenne annuelle est voisine de 14-16°.

La zone méditerranéenne n'a pas de mois tropicaux, mais un nombre variable de mois arides et tempérés. On observe toutefois de fortes variations suivant ^{que l'on} considère la rive nord ou sud de la Méditerranée, ou bien l'est et l'ouest de cette mer . En effet, la côte sud de la Turquie, le Liban reçoivent des précipitations supérieures à 1200 mm, alors que l'Egypte, Israël, la Syrie intérieure reçoivent moins de 200 mm. Des variations aussi brutales peuvent être observées en Californie .

Les régions comme les environs de Mexico, bien que situées en zone intertropicale, ont un climat marqué par une température relativement égale et une pluviométrie de 600 mm. Malgré l'absence de saison fraîche, l'environnement a bien des caractéristiques reconnues autour de la Méditerranée, ce qui fait que le climat méditerranéen peut se synthétiser par une température moyenne annuelle de 14-16°, une pluviométrie de 600-800 mm et une saison sèche nettement marquée; un nombre variable de mois tempérés et arides.

La végétation de la zone méditerranéenne, en raison de l'existence de plusieurs mois arides, a parfois un caractère xérophile accusé. Elle comprend des espèces à feuilles réduites et des végétaux sclérophylles aptes à résister à une saison sèche particulièrement marquée. Il est très difficile de définir une formation caractéristique, ne serait-ce que par suite de la très grande ancienneté du peuplement humain qui a pu modifier considérablement la végétation .

Les phytogéographes reconnaissent toutefois la spécificité de quelques espèces comme le chêne-vert, le chêne-liège, certains pins (1), et quelques plantes qui les accompagnent généralement .

(1) Quercus ilex, Quercus suber, Pinus halepensis etc....

La forêt apparaît bien être la formation naturelle qui se développe loin de toute action humaine. Il peut lui succéder le maquis riche en arbustes et lianes; la garrigue comporte de nombreuses espèces herbacées associées à quelques arbustes. Tous ces végétaux constituent une proie pour les flammes en été et peuvent être facilement détruits. Dans les parties arides de la zone, une végétation herbacée de type steppe se développe .

Le relief est, en zone méditerranéenne, le plus souvent montagneux, avec une dominance de roches calcaires et dolomitiques. Une grande partie du pourtour de la Méditerranée, la côte californienne, le Mexique central ont été affectés par les plissements alpins qui ont porté souvent à forte altitude des roches dont la genèse s'est effectuée en milieu marin et où dominent très largement les carbonates de calcium et magnésium, ce qui était rarement le cas dans la zone intertropicale où les roches acides et les sédiments continentaux l'emportaient. Cette abondance de calcaire a forcément, dans une zone climatique où la pluviométrie est modeste et l'évaporation intense, des répercussions importantes sur les sols .

Il existe bien entendu des plaines ou zones déprimées analogues à celles de l'Afrique intertropicale (dépression de Siwa, Kattara en Egypte), des zones de remblayage alluvial comme la plaine de Mésopotamie, etc.....

Les sols de cette zone présentent une variété qui répond à celle des climats, de la végétation, du relief. On connaît des sols à hydroxydes (sols rouges et bruns méditerranéens), des sols isohumiques, où l'influence du calcium est considérable , des sols halomorphes, hydromorphes, peu évolués. On y connaît également des sols lessivés, voire podzoliques. Il s'agit en effet d'une zone qui subit, ou a subi, l'influence de la chaleur et de l'humidité. Mais dans certaines régions d'altitude, ^{on} retrouve les conditions climatiques des pays de la zone tempérée située plus au Nord. Au cours des temps quaternaires, des variations climatiques importantes ont eu lieu, accompagnées de différences notables dans le niveau de base, ce qui a pu entraîner des remaniements des sols développés antérieurement .

Enfin, cette région méditerranéenne est certainement une des plus anciennement peuplées du globe. Elle est le berceau de la civilisation occidentale. Mais elle a été également le théâtre de migrations humaines au cours des derniers millénaires de populations de degrés de civilisation très variés, de mode de vie agricole et pastoral très divers. Il en résulte que les sols ont subi des variations très importantes dans le mode de traitement, de mise en valeur.

6.- CONCLUSION -

Les zones intertropicale et méditerranéenne présentent un ensemble de caractères qui font que les sols ont une tendance marquée vers l'individualisation des hydroxydes de fer surtout, et, éventuellement, d'aluminium. Lorsque les conditions de drainage sont difficiles ou réduites, des vertisols, des sols hydromorphes, des sols halomorphes peuvent prendre une importance notable.

Du point de vue relief, la zone intertropicale correspond soit à de grandes zones très fortement aplanies avec des plateaux ou des dépressions, soit à des reliefs très accidentés résultant d'orogénèses récentes. Les zones planes ont des sols dérivant surtout de roches éruptives, métamorphiques, parfois volcaniques ou sédimentaires d'origine continentale; dans les zones accidentées, le calcaire et le basalte sont les roches-mères les plus fréquentes. La végétation primitive apparaît, sauf dans la zone désertique, dominée par des formations arborées. La présence de populations à la recherche de pâturages pour leurs troupeaux, de terrains de culture, a provoqué des destructions importantes de cette végétation et son remplacement par des peuplements secondaires.

7.- BIBLIOGRAPHIE -

AUBREVILLE (A.) - 1949.- Climats, forêts et désertification de l'Afrique Tropicale. Société d'Ed. Géogr., maritimes et coloniales, Paris, 351 p.

- BIROT (P.) - 1959.- Précis de géographie physique générale.
A. Colin, Paris. 403 p.
- BIROT (P.) , DRESCH (J.) - 1956.- La Méditerranée et le Moyen
Orient. PUF, Paris, 2t. 544 et 517 p.
- C.S.A. - 1956.- Réunion de spécialistes du C.S.A. en matière de
phytogéographie à Yangambi. Publ. CCTA, 530, 31p.
Watergate House, London .
- DRESCH (J.) - 1967.- Les paysages tropicaux humides ; la zone
aride; in : Géographie générale publ. sous la dir.
de A. Journaux et collab. Encyclopédie de la Pléiade.
Gallimard, Paris, pp. 609-780
- FURON (R.) - 1962.- Géologie de l'Afrique. 2^e éd. Payot, Paris,
400 p.
- GOUROU (P.) - 1947.- Les pays tropicaux. PUD, Paris, VIII, 100 p.
- KACHKAROV (D.N.), KOROVINE (E.P.) - 1942.- La vie dans les déserts.
Payot, Paris . 361 p.
- KENDREW (W.G.) - 1953.- The climates of the continents. 4th.ed.
Clarendon Press, Oxford, 606 p.
- KING (L.C.) - 1962 - Morphology of the earth. Oliver and Boyd,
London, XII, 699 p.
- LETOUZEY (R.) - 1958 - Phytogéographie camerounaise. Atlas du
Cameroun. Publ. IRCAM, Yaoundé, 4p. 1 carte
1/2.000.000.
- PEGUY (Ch.P.) - 1961 - Précis de climatologie. Masson, Paris,
347 p.
- PERRIER de la BATHIE (H.) - 1926 - Biogéographie des Plantes de
Madagascar. Soc. Ed. géog. Marit. Colon. Paris.156p.
- SCHNELL (R.) - 1950.- La forêt dense. Le Chevalier, Paris.330 p.
16 pl.
- TRICART (J.), CAILLEUX (A.) - 1960-1961.- Le modelé des régions
sèches. C.D.U., Paris, 2 t. 129 + 179 p. multigr.
- TRICART (J.), CAILLEUX (A.) - 1965 - Traité de géomorphologie.
Le modelé des régions chaudes; forêts et savanes.
SEDES, Paris . 322 p.
- TROCHAIN (J.L.) - 1940 - Contribution à l'étude de la végétation
du Sénégal . Larose, Paris. 433 p.

2ème Partie

Le Sol - Définitions et Constituants .

La notion de sol a très sensiblement varié au cours des deux derniers siècles, suivant la manière dont on le considère: simple support pour la végétation ou bien corps naturel situé à la surface de la lithosphère et formé sous l'influence de facteurs physiques, chimiques et biologiques. Le sol a une morphologie spécifique et est divisé en horizons qui ont reçu des désignations particulières suivant le rôle qu'ils jouent. Les caractéristiques de ces horizons sont très nombreuses et ont donné naissance à une terminologie variant d'un pays à l'autre .

Le sol comprend essentiellement deux sortes de constituants : organiques et minéraux. Les produits organiques d'origine animale ou végétale subissent des transformations qui aboutissent à la formation de l'humus lui-même un mélange de substances très complexes. Les constituants minéraux sont des résidus de la roche-mère et des produits synthétisés dans le sol. Ceux-ci sont très variés et appartiennent à des familles minérales très diverses : sels, silicates d'alumine, oxydes et hydroxydes. Tous ces produits sont cristallisés ou amorphes. Les fractions organique et minérale peuvent demeurer séparées, mais le plus souvent elles sont intimement liées pour former le " complexe argilo-humique" susceptible de fixer des ions positifs ou négatifs d'où le nom de " complexe absorbant ".

C h a p i t r e 2

QUELQUES DEFINITIONS SUR LE SOL

- 2.1 - LE SOL . SA DEFINITION
- 2.2. - NOMENCLATURE DES HORIZONS
- 2.3. - QUELQUES HORIZONS PARTICULIERS
 - 2.3.1 - Horizons de surface
 - 2.3.2.- Horizons de profondeur

2.1 - LE SOL - SA DEFINITION

La définition du sol a beaucoup varié au cours des temps; elle a dépendu essentiellement de la façon dont on envisageait le sol et son utilisation .

Les premiers chercheurs étaient avant tout des agronomes qui avaient observé que toute plante puisait dans le sol les éléments nutritifs dont elle avait besoin pour son développement. Le sol fut donc considéré tout d'abord comme un support pour la végétation et une réserve pour son alimentation .

Certaines définitions furent donc très marquées par cette conception. C'est ainsi, par exemple, que MITSCHERLICH donne la définition suivante : " Le sol est un mélange de particules solides pulvérisées, d'eau et d'air, qui servent de support aux éléments nutritifs des plantes . "

RAMANN perfectionna cette définition en présentant le sol comme " la couche supérieure meuble de l'écorce terrestre. Elle comprend des roches qui ont été réduites en petits fragments et plus ou moins transformés chimiquement avec des débris de plantes et animaux qui vivent dessus et s'en servent . "

DOKUCHAEV avait considéré le sol sous un angle véritablement pédologique. Il prend une individualité propre différente de la roche-mère dont il est issu; il est constitué par " les horizons supérieurs d'une roche qui a subi, plus ou moins, un changement sous l'influence de l'eau, de l'air , et différentes espèces d'organismes vivants ou morts; ce changement se traduit, dans une certaine mesure, dans la composition, la structure, la couleur des produits d'altération " .

Par la suite la définition se perfectionne encore et les différents auteurs s'efforcent de bien montrer l'individualité du sol qui est considéré comme un corps naturel . Pour JOFFE, " le sol est un corps naturel, de constituants organiques et minéraux, différencié en horizons d'épaisseur variable, qui diffèrent du matériau sous-jacent par leur morphologie, constitution physique, propriétés chimiques et composition des caractères biologiques."

Cette définition insiste sur les points principaux suivants :

- 1 - L'individualité du sol (différent de la roche-mère dont il est issu).
- 2 - La constitution à la fois organique et minérale.
- 3 - La morphologie.
- 4 - Les propriétés physiques, chimiques et biologiques différentes de celles du matériau dont il dérive.

DEMOLON attire l'attention sur le fait que le sol est situé à la limite de l'atmosphère et de la lithosphère et qu'il apparaît comme la résultante de l'une sur l'autre . Le sol est alors " la formation naturelle de surface à structure meuble et d'épaisseur variable, résultant de la transformation de la roche-mère sous-jacente sous l'influence de divers processus physiques, chimiques et biologiques ."

Il convient de rappeler ici qu'un " sol agricole " résulte de la transformation par l'homme des sols vierges en vue de l'obtention de récoltes. Cette transformation s'accompagne de modifications de la morphologie, des propriétés, et de la composition des sols.

L'examen du sol ne peut se faire que par l'observation d'une coupe soit dans une fosse creusée à cet effet, soit grâce à une coupe naturelle. Le sol se présente comme constitué d'un certain nombre de couches plus ou moins horizontales ayant des caractéristiques physiques, chimiques et biologiques définies et dénommées horizons. L'ensemble des horizons depuis la surface jusqu'à la roche sous-jacente du sol est dénommé le profil .

2.2 - DESIGNATION ET NOMENCLATURE DES HORIZONS

Les pédologues du monde entier désignent les différents horizons par des lettres majuscules A.B.C.R. Ils y attachent une signification qui peut varier légèrement d'un pays à l'autre. Les pédologues français ont adopté la terminologie suivante :

Horizon A

Cet horizon est subdivisé en A_{00} - A_0 - A_1 - A_2 - A_3 . L'horizon A est un horizon majeur occupant la partie supérieure ou l'ensemble du profil et présentant l'un ou l'autre des caractères suivants ou les deux en même temps :

- a. Présence de matière organique.
- b. Appauvrissement en constituants tels que argile, fer, alumine, etc

Les horizons A_{00} , A_0 d'une part, les horizons A_1 , A_2 , A_3 d'autre part, se superposent dans l'ordre indiqué quand ils sont présents simultanément dans le profil .

A_{00} - Horizon de surface, formé de débris végétaux facilement identifiables (feuilles, brindilles et autres) et non reliés ensemble par du mycélium. Cet horizon correspond à ce que divers auteurs désignent parfois par la lettre L. :

A_0 - Horizon constitué principalement de débris végétaux partiellement décomposés et pratiquement non reconnaissables sur le terrain. Les horizons peuvent être subdivisés en F et H. La couche H se distingue de F par l'absence complète de structure végétale. A l'analyse, ils contiennent en général plus de 30% de matière organique totale. Ils sont mesurés de bas en haut à partir du sommet de A_1 . Certains de ces horizons peuvent manquer.

L'horizon A_1 est un horizon minéral présentant en général moins de 30% de matière organique bien mélangée à la partie minérale, et de couleur généralement sombre. Il peut être ou non un horizon éluvial.

L'horizon A_2 est un horizon de couleur plus claire que l'horizon sus-jacent; il est appauvri en fer, en argile, en aluminium avec concentration corrélative de minéraux résistants. C'est un horizon d'éluviation par lessivage de matériaux en solution ou suspension. Les éléments se déplacent généralement à l'état dissous ou dispersés vers l'horizon B et / ou hors du profil .

L'horizon A_3 est un horizon de transition entre A et B, mais il est plus proche de A que de B. Si l'horizon de transition ne peut être valablement attribué à l'un ou à l'autre, on écrira AB.

Horizon B.

Horizon majeur situé au-dessous de A et caractérisé par des teneurs en argile, en fer, en humus, plus élevées qu'en A ou C. Cet enrichissement peut être dû, soit à des transformations sur place des minéraux préexistants, soit à des apports illuviaux. On désigne ^{alors} cet horizon par B.

Si la variation de teneur est très faible et que la différenciation avec A ou C ne porte que sur la consistance, la structure ou la couleur, on désignera cet horizon par (B).

Une lettre minuscule, placée après B, précisera la nature de l'enrichissement ou de la différenciation .

L'horizon est divisé en :

B_1 Horizon de transition avec A, mais plus proche de B que de A

B_2 Horizon constituant la partie essentielle de B, correspondant soit à l'accumulation principale, soit au développement maximum de la différenciation .

B_3 Horizon de transition avec C, mais plus proche de B que de C.

N.B. On peut affecter les horizons d'un nouveau chiffre secondaire (tel que B_{21} , B_{22} ..., etc..) sans autre signification que d'avoir introduit une subdivision .

Horizon C.

Horizon minéral, autre que la roche brute, placé sous B (ou sous A, s'il n'y a pas de B), analogue ou différent du matériau dont dérive la coupe AB et relativement peu affecté par les processus pédogénétiques ayant conduit à l'individualisation des horizons A et B sus-jacents et ne présentant pas leurs caractéristiques .

Horizon R.

Roche brute sous-jacente.

En cas de discontinuité lithologique, on désigne: chaque matériau originel par un chiffre romain qui précèdera l'horizon. S'il n'y a qu'un seul matériau, on omet. le chiffre romain. Dans le cas de plusieurs matériaux, celui du dessus (1) peut être omis.

Ex.: $A_1 - A_2 - B_1 - B_{21} - II B_{22} - II B_3 - II C_1 - III C_2 -$
IV R.

Symboles utilisés pour désigner les caractéristiques particulières des horizons précédents :

Ca	Accumulation de calcaire	{ Ca diffus Ca en nodules
cs	Accumulation de sulfate de calcium	
cn	Accumulation de concrétions ferroalumineuses	
g	Pseudogley	
G	Gley	
sa	Sels plus solubles que le sulfate de Ca	
p	Horizon labouré (ou perturbé)	
B ₂ ^h	Horizon d'accumulation humique	{ des podzols
B ₂ ^h fe	Horizon d'accumulation ferrugineuse	
Bt	Horizon d'accumulation d'argile (textural)	
x	Fragipan : horizon induré à l'état sec, mou à l'état humide	
m	Horizon massif à forte cimentation	

2.3. QUELQUES DEFINITIONS CONCERNANT DES HORIZONS PARTICULIERS OU BIEN DES ELEMENTS CARACTERISTIQUES DES PROFILS .

Certaines de ces définitions s'appliquent plus spécialement aux sols des régions tempérés mais peuvent, dans de nombreux cas, s'appliquer aux sols des régions méditerranéenne et inter-tropicale. On donne également quelques termes extraits de la 7ème Approximation de la classification américaine .

Horizons de surface ou horizons organiques

Les pédologues français et européens utilisent un certain nombre de termes pour désigner les horizons organiques qui diffèrent suivant qu'ils se sont formés en milieu aérobie ou anaérobie.

. En sols bien aérés on connaît :

Mor La matière organique est bien décomposée mais non incorporée à la matière minérale; les transformations sont dues essentiellement aux champignons; elle constitue un A_0 net et épais, de pH inférieur à 5,0.

Moder La matière organique est incorporée incomplètement à la matière minérale, il n'y a pas de complexe argilo-humique; il existe des micro-agrégats organiques juxtaposés aux particules minérales; les transformations biologiques sont fortes et dues aux insectes. La saturation est faible et le pH inférieur à 5,0

Mull Le complexe argilo-humique est constitué et l'incorporation de la matière organique à la matière minérale est assurée dans l'horizon A_1 . La microstructure est à base d'agréats de 0,1 à 1 mm; les transformations biologiques sont fortes, l'action des vers est importante le pH va de 5 à 6,5 . On parle de mull calcique lorsqu'il y a saturation par du calcium et magnésium, ou bien lorsqu'il y a du calcaire actif en abondance. La structure est en gros grumeaux très stables. Il y a synthèse d'une grande quantité d'acides humiques; le pH va de 7,5 à 8,5 .

. En sols non aérés, on connaît les produits suivants :

Tourbe L'incorporation de la matière organique à la matière minérale est nulle ou très faible; les transformations biologiques sont peu importantes et des débris végétaux sont généralement bien reconnaissables .

Anmoor L'incorporation est à peu près complète; la transformation biologique très forte avec une humification très poussée .

Les termes de mor et moder sont rarement employés pour les sols des zones méditerranéenne et intertropicale; les pédologues discutent pour savoir si le terme de mull convient. Les termes de " mull calcique, tourbe et anmoor " semblent s'appliquer très bien à certains sols/^{inter}tropicaux et méditerranéens. En zone tropicale on peut parler " d'humus équatorial " acide ou très acide, au C/N voisin de 10-12 où l'acide fulvique l'emporte nettement sur l'acide humique, d' " humus tropical ", moyennement acide au C/N voisin de 13-15 où l'acide humique et l'acide fulvique sont en proportions à peu près égales, d' " humus subaride " généralement peu abondant neutre, ou presque, au C/N voisin de 10 où l'acide humique l'emporte sur l'acide fulvique .

Les américains ont subdivisé le profil en deux parties.

La partie supérieure est l' " épipedon ", qui peut comprendre tout ou partie de A, éventuellement une partie de B. Elle est assombrie par la matière organique. Un certain nombre de types d'épipedons ont été distingués :

épipedon ochrique. La couleur est peu foncée. Les teneurs en matière organique sont faibles, le rapport C/N voisin de 10, les teneurs en bases modestes. De nombreux sols tropicaux présentent un tel épipedon .

épipedon umbrique. Les couleurs sont sombres, les teneurs en matière organique fortes, le cation dominant est l'hydrogène, le rapport C/N élevé. De tels épipedons sont présents dans les zones montagneuses fraîches mais pluvieuses de la zone intertropicale .

épipedon mollique. Les couleurs sont sombres, mais les teneurs en matière organique peuvent être modestes, les cations bivalents saturant le complexes; le rapport C/N est proche de 10; la structure est caractéristique. Cet épipedon est fréquent dans certains sols des zones assez sèches (il est comparable à l'horizon tchernozémique et au mull calcique)

épipedon histique. Les couleurs sont sombres; le plus souvent très acide et associé à l'eau (équivalent de tourbe).

Horizons de profondeur ou horizons minéraux.

Les pédologues de langue française utilisent fréquemment, pour désigner les horizons profonds, quelques expressions dont les plus courantes sont rappelées ici.

Horizon B.

- Horizon B textural - Cet horizon B est enrichi en colloïdes (argile ou fer).
- Horizon "B structural "ou (B) - Cet horizon diffère de l'horizon C par son degré d'altération plus prononcé et de l'horizon A par une structure plus marquée, en général plus compacte .
- Horizon B de consistance - Ce terme s'applique à un horizon B dont une caractéristique sera une consistance plus forte que dans A et C .
- Horizon B de couleur - Une caractéristique importante est une couleur prononcée.

L'horizon tacheté est caractérisé par une alternance de taches rouges ou ocre avec des plages blanches ou grises indiquant un mouvement local de fer .

Une cuirasse désigne un horizon riche en sesquioxydes de fer, aluminium et / ou titane et manganèse, associés à de la kaolinite, du quartz, suffisamment indurés pour ne se fragmenter qu'à l'aide du marteau ou de la barre à mine .

Une carapace a sensiblement la même constitution mais se fragmente beaucoup plus facilement (piochon ou pelle).

Le terme de croûte désigne un niveau durci riche en carbonate de calcium .

Un alios est un horizon durci riche en hydroxydes de fer et humus qui s'observe dans les podzols .

Les pédologues américains distinguent un certain nombre d'horizons qu'ils qualifient de caractéristiques et qui leur servent dans l'identification de certains sols.

L'horizon argillique correspond à un horizon illuvial où l'argile s'est accumulée, qu'on peut identifier par une augmentation importante d'argile ou bien par des revêtements sur les agrégats. Cet horizon est assez peu fréquent en Afrique tropicale .

L'horizon natrique est une variété d'horizon argillique ayant une structure particulière en colonnes et plus de 15% de sodium dans le complexe absorbant. On peut observer cet horizon dans les sols halomorphes .

Dans l'horizon carbique se produisent des changements tels qu'individualisation d'argile, de fer . La roche originelle n'est pas reconnaissable. Cet horizon constitue une transition vers l'horizon argillique ou oxique. On l'observe dans des sols encore peu développés.

L'horizon oxique est caractérisé par des oxydes ou hydroxydes de fer et aluminium et de la kaolinite. Il est poreux, n'a pas de structure très nettement définie, les couleurs sont variables. L'horizon oxique est en fait l'horizon B des sols ferrallitiques .

Eléments particuliers dans les profils des sols des zones méditerranéenne et intertropicale .

Le terme de Gilgai correspond à un microrelief rencontré dans des sols où l'argile montmorillonitique est abondante mais qui peut exister aussi dans des sols à kaolinite . On a une succession de petites dépressions avoisinant des buttes .

Mulch : Formation d'une structure polyédrique fine aplatie en surface. On utilise aussi le terme " self-mulching " pour désigner un sol où cette structure s'obtient spontanément sans intervention humaine .

Slickenslides : Appellation désignant des surfaces obliques de glissement dans un sol argileux (vertisol par exemple).

Concrétion: collection riche en oxyde de fer et alumine ou oxyde de fer seul, généralement de petite taille et de forme arrondie, avec souvent une pellicule de couleur différente (plus foncée) que l'on trouve dans les sols ferrallitiques et ferrugineux tropicaux .

Amas concrétionné : collection analogue, quant à la composition, à la précédente. Mais la forme est variable, avec des cavités plus ou moins importantes; la taille est en gros celle du poing.

Gravillon - collection assez analogue aux précédentes mais provenant du fractionnement d'une cuirasse ou d'une carapace; le plus souvent, il est recouvert d'une patine sombre .

Nodule : collection de carbonate (de chaux surtout) arrondie, dure, de la taille d'un poids ou d'une bille que l'on trouve dans certains sols tels que les vertisols .

" Stone-line " Cette expression désigne une couche de cailloux (quartz, débris de roche ferruginisée ou débris de cuirasse), située à faible profondeur dans un profil et épousant en gros la topographie. C'est l'équivalent de nappe de cailloux ou nappe de gravats .

C h a p i t r e . 3

LES CONSTITUANTS DU SOL

3.1. LES CONSTITUANTS ORGANIQUES

- 3.1.1. L'Humus, son fractionnement
- 3.1.2. Composition chimique de l'humus.
- 3.1.3. Formation des acides humiques.
- 3.1.4. Propriétés de l'humus .

3.2. LES CONSTITUANTS MINÉRAUX

- 3.2.1. Les minéraux primaires
- 3.2.2. Les minéraux secondaires
- 3.2.3. Les produits de synthèse cristallisés.
Sels, argiles, oxydes et hydroxydes .
- 3.2.4. Produits amorphes

Ce chapitre comprendra naturellement deux parties :

les constituants organiques

les constituants minéraux

1.- Les constituants organiques des sols.

La matière organique des sols provient de la décomposition des produits d'origine animale et des produits végétaux qui s'accumulent à sa surface : débris de tiges, de feuilles, mais également de racines pouvant constituer une source de matière organique importante .

La décomposition s'effectue par voie biologique, les microorganismes : bactéries et les champignons attaquent les substances hydrocarbonées (cellulose) qui constituent des matières énergétiques et également les protéines ou matières azotées, qui peuvent être décomposées en acides aminés puis en ammoniacque .

Les matières carbonées sont souvent éliminées à l'état de gaz carbonique. L'ammoniacque est oxydée en nitrate qui sert à l'alimentation des plantes, ou est parfois réintégrée dans les microorganismes ou éliminée dans les eaux de drainage. Cette production de gaz carbonique, de nitrates ou d'autres composés minéraux, phosphates, sulfates, à partir de la ma-

tière organique en décomposition, s'appelle la minéralisation

Cette minéralisation est un processus essentiel pour la vie des plantes supérieures; elle règle le cycle de la vie végétale et animale sur terre .

1.1. L'humus, son fractionnement.

En outre de la minéralisation, il se produit dans le sol une accumulation d'un résidu de couleur noire, résistant à la décomposition. Ce résidu qui possède des propriétés particulières porte le nom d'humus; il est plus ou moins fortement lié à la matière minérale du sol .

Le complexe argilo-humique peut être séparé de la matière végétale non décomposée; en agitant le sol dans une liqueur lourde de densité 2, l'humus stable est entraîné par densité avec les matières minérales lourdes. L'analyse de cet humus stable, montre qu'il est riche en carbone et azote, avec un rapport C/N voisin de 10. Il y a donc un fort enrichissement en azote par rapport à la matière végétale d'origine qui n'en contient pas plus de 2%, c'est-à-dire un rapport C/N voisin de 50 .

Chimiquement, cet humus peut être extrait par des solutions alcalines après décalcification du sol, ou par des sels alcalins complexants, comme le pyrophosphate de sodium à pH = 10. On obtient une solution noire d'humate de sodium. Cette solution noire est précipitée par un acide comme l'acide sulfurique .

La fraction insoluble en milieu acide est constituée par des composés appelés acides humiques qui sont très colorés.

La fraction restant en solution est incolore, mais contient néanmoins des composés organiques appelés acides fulviques.

La matière organique résistante aux attaques alcaline s'appelle l'humine.

1.2. Composition chimique de l'humus.

De nombreuses méthodes ont été appliquées pour déterminer la composition de l'humus :

- . Analyse élémentaire.
- . Hydrolyse et analyse des produits hydrolysés.
- . Etude des spectres d'absorption aux rayons ultraviolets ou infra-rouges .

L'analyse après hydrolyse a montré que l'humus contenait des corps à noyau aromatique avec des fonctions acides, phenol ou quinone, tel l'acide vanilique .

On a constaté en outre, que, par exemple, la lignine extraite d'une paille en décomposition, présentait à l'analyse aux rayons ultra-violetts ou infra-rouges, un spectre très voisin de celui des acides humiques. Il semble donc que la lignine des végétaux soit une source essentielle de l'humus .

Des études plus récentes ont montré qu'il était possible d'hydrolyser les produits de décomposition de la lignine pour obtenir des composés à une oxydation en milieu alcalin, soit en présence d'une diastase (la phénoloxydase), soit en présence de cultures de champignons, on provoque la formation de dimères puis de polymères donnant des produits colorés dont les propriétés sont très voisines de celles des acides humiques naturels. Une simplification des molécules et une augmentation de la proportion des noyaux aromatiques se produisent au cours de la polymérisation par décarboxylation, déméthylation etc,...; il y a fixation d'acides aminés au cours de la polymérisation, avec des processus de désamination .

L'humification se produit donc en deux phases :

1°- Destruction de la molécule de lignine et d'autres produits organiques en noyaux plus simples; 2°- recombinaison des noyaux et polymérisation (l'oxygène et un milieu alcalin la favorisent). La polymérisation des noyaux aromatiques peut être plus ou moins importante et l'on aboutit à des composés de poids moléculaires variable .

En schématisant le processus, les molécules peu polymérisées constituent les acides fulviques.

Les molécules moyennement polymérisées constituent des acides humiques dits Bruns. Les molécules fortement polymérisées forment des acides humiques Gris.

Les acides humiques Bruns et Gris sont précipitables par les acides et il est possible de les séparer par une électrophorèse. Les acides humiques bruns sont plus mobiles et migrent vers l'anode. Les acides humiques gris se déplacent très peu sous l'action du courant électrique. Il est possible d'effectuer des diagrammes d'acides humiques et de déterminer leurs proportions relatives .

1.3. Formation des acides humiques.

En milieu mal aéré et fortement inondé, les champignons ne peuvent attaquer la lignine, et elle s'accumule, les autres composés étant décomposés par voie anaérobie (cas des tourbes).

En milieu aéré et très acide, les champignons attaquent la lignine et donnent des composés acides peu polymérisés, les acides fulviques. La polymérisation est favorisée par la présence de l'ion calcium et une alternance d'humidité et de sécheresse. La proportion d'acides humiques gris augmente dans les sols riches en calcium, et sous les climats alternés humides et secs. La proportion d'acides humiques bruns et fulviques augmente dans les sols acides et les climats humides .

Les podzols et les sols ferrallitiques très désaturés sont riches en acides humiques bruns, et pauvres en acides humiques gris. Les sols calcimorphes des régions sèches, les vertisols, les sols isohumiques sont riches en acides humiques gris; la proportion d'acides humiques bruns peut être variable suivant les cas .

L'argile , et en particulier la montmorillonite, favorisent la fixation de l'humus sur le sol , et jouent un rôle protecteur contre la destruction de l'humus .

L'humification des matières végétales dépend de la température, de l'humidité, du pF.

Dans les régions froides, en montagne, dans les sols fortement inondés ou très acides, la matière organique s'accumule sous forme grossière et s'humifie peu . Le rapport C/N est supérieur à 15 ou 20.

Dans les régions chaudes, aux sols bien drainés et peu acides, la matière organique se décompose bien; le rapport C/N est voisin de 10, la proportion d'acides humiques est plus importante .

1.4. Les propriétés de l'humus . .

La nature de la matière organique grossière ou humifiée, la proportion relative des acides humiques ou fulviques, dépendent donc étroitement des conditions de climat, de roche-mère, de drainage, et aussi de la nature des produits végétaux (plus ou moins ligneux), c'est donc un élément en étroite liaison avec les conditions de la pédogénèse; elle en est à la fois un excellent reflet et une cause importante de la formation des sols, par l'action dissolvante ou complexante des produits organiques formés.

Enfin, l'humus est un facteur essentiel de fertilité:

- . par ses propriétés physiques sur la structure du sol ou la rétention d'eau.
- . comme réserve d'azote pour les plantes, et aussi de phosphore et de soufre.
- . comme colloïde possédant une forte capacité d'échange de bases. (de l'ordre de 300 mé. pour 100 g.)
- . comme siège principal de la vie microbienne dans le sol.
- . comme élément tampon agissant sur presque tous les métabolismes de la nutrition des plantes .
- . comme source de substances de croissance .

2. LES CONSTITUANTS MINÉRAUX.

On trouve dans les sols une variété assez grande de constituants minéraux; mais dès le départ, il est essentiel de faire une distinction fondamentale entre les constituants dits "primaires" ou "hérités" qui proviennent intacts ou en tout cas peu modifiés de la roche dont est issu le sol, et les constituants "secondaires" formés dans le sol par transformation d'un minéral préexistant ou bien par synthèse après destruction complète des minéraux préexistants .

2.1. Les minéraux primaires

Ce sont, en général, les plus résistants des minéraux des roches-mères, ceux qui subissent le minimum de modifications par dissolution, hydrolyse, oxydation ou réduction dans le sol. Le plus important est le quartz abondant dans les granites, gneiss, etc... Il faut un temps très long pour le faire disparaître des sols. D'autres minéraux primaires comme l'ilménite, la magnétite, le zircon, la tourmaline, etc.... sont très résistants à l'altération et se retrouvent dans la fraction sableuse des sols évolués des régions tropicales. On peut également trouver des minéraux altérables comme les feldspaths, amphiboles, pyroxènes etc.... Ils indiquent alors que l'on a affaire à un sol peu évolué, ou bien que l'on est près de la zone de départ .

On peut trouver également dans un sol des minéraux argileux (formés généralement à partir des minéraux silicatés). S'ils se sont formés dans le sol où on les observe, ils sont typiquement de synthèse et sont passés en revue plus loin. Certains se sont formés dans des milieux tout à fait particuliers, très riches en sels de magnésium et aboutissent à la formation de minéraux fibreux comme la sépiolite et l'attapulгите. Ces minéraux sont généralement peu stables dans les sols et sont rapidement remplacés par d'autres. Dans certains cas, cependant, on observe dans les sols des minéraux propres aux sols mais provenant des roches-mères situées au-dessous. Dans les régions méditerranéennes, les sols dérivés de calcaires renferment souvent des minéraux argileux contenus dans les roches sous-jacentes (kaolinites, illites ou montmorillonites). Il s'agit dans ce cas d'héritage. Les climats semi-arides étant relativement peu agressifs, il n'y aura que très peu de transformation ou de synthèse, mais plus spécialement conservation .

2.2. Les minéraux secondaires .

Ces minéraux se sont constitués au cours de la pédogénèse. Ils sont stables dans les conditions hydratantes, oxydantes ou réductrices du sol .

Ils résultent de "transformations" de minéraux préexistants sans modifications fondamentales de la structure. C'est le cas, par exemple, de la transformation de mica en hydronica. Ce minéral est en réalité un interstratifié de mica et vermiculite. Il résulte de l'enlèvement des tenons potassium, non échangeables, et de l'introduction entre les feuillettes d'ions magnésium et de molécules d'eau. Bien d'autres transformations sont possibles dans le sol.

Cependant, un grand nombre de minéraux résultent de "synthèses". La structure des minéraux primaires (feldspathoïdes, feldspaths, amphiboles, pyroxènes, péridots, etc...) est très différente de celle des minéraux secondaires. On est donc amené à penser que les molécules primitives sont détruites jusqu'à former des ions. Ceux-ci réagissent avec l'eau pour former des hydroxydes, ou bien entre eux pour former des molécules complexes de silicates d'alumine, de fer, ^{de}/magnésium. Dans la partie très humide de la zone tropicale, les hydrolyses sont très intenses, les synthèses sont prépondérantes et n'aboutissent qu'à un petit nombre de produits stables dans ces conditions. Par contre, dans les zones plus sèches, l'hydrolyse est moins intense et l'on aboutit à une gamme plus variée de produits.

On a pu distinguer plusieurs types de milieux générateurs de produits secondaires (MILLOT, 1964). Le milieu lessivé est fortement privé en bases, et partiellement privé de silice; il est favorable à la formation d'hydroxydes de fer et alumine et de kaolinite relativement pauvre en silice. Le milieu confiné est plus riche en bases et en silice. Ce milieu est peu favorable à l'individualisation de produits ferrugineux et alumineux mais par contre, la formation de minéraux argileux 2 : 1 est prépondérante.

Certains minéraux peuvent être considérés comme primaires ou secondaires. Le carbonate de calcium peut exister dans le sol lorsque la roche-mère est calcaire. Il s'agit alors d'un produit résiduel. Par contre, dans certains sols dérivant de roches non calcaires, l'abondance d'ions calcium, un drainage peu efficace, peuvent favoriser la formation de carbonate qui s'accumule dans le sol sous des formes très variables (pseudo-mycelium, nodules, croûtes; etc....).

2.3. Les produits de synthèse cristallisés.

On peut distinguer trois grandes catégories de produits : sels, silicates, oxydes et hydroxydes .

2.3.1. Les sels solubles.

Les sels apparaissent dans les sols surtout dans les conditions d'aridité marquée, ou bien lorsque le drainage est contrarié et déficient. Les métaux sont le plus souvent des alcalins ou alcalino-terreux, parfois aussi du fer. Les anions sont l'ion carbonique fourni par le gaz carbonique de l'air ou la décomposition de la matière organique. Les ions sulfure, sulfate, phosphate, proviennent de la matière organique ou de roches qui peuvent les contenir. D'une manière générale, le chlorure de sodium, le sulfate de chaux ne sont pas synthétisés dans le sol mais proviennent de dissolution de ces sels dans les sédiments qui les contenaient .

Le carbonate de calcium (CO_3Ca : le plus souvent calcite, rarement aragonite) est un produit facile à identifier grâce à sa réaction avec les acides, même formes d'accumulation très différentes qui ont été étudiées par de nombreux auteurs, tels DURAND, RUELLAN et WILBERT (cf. chap. 11). Les sols de la zone méditerranéenne sont particulièrement riches en formes diverses d'accumulation calcaire (sols isohumiques, vertisols, etc....). Dans la zone intertropicale, ces accumulations sont peu fréquentes : pseudo-mycélium et nodules dans certains sols halomorphes, nodules dans les vertisols.

Le carbonate de magnésium ou gibbertite, CO_3Mg ; est peu fréquent. On l'observe en Nouvelle-Calédonie où les roches magnésiennes (péridotites) sont abondantes.

Le carbonate de sodium, CO_3Na_2 , n'existe que dans les zones endoréiques où arrivent des solutions renfermant du sodium provenant de l'altération de roches à minéraux calco-alcalins (andésites, gneiss et granites divers). Si aucun autre anion n'est présent en proportion notable, il y a précipitation de natron, $\text{CO}_3\text{Na}_2, \text{CO}_3\text{NaH}, 2 \text{H}_2\text{O}$. C'est le cas de bassins fermés d'origine volcanique (Vallée de Mexico, Lac Natron au Kenya) ou bien de

cuvettes lacustres recueillant des eaux provenant du socle cristallin (cuvette tchadienne).

Le sulfate de sodium ou thénardite SO_4Na_2 est peu fréquent. Il est signalé dans le désert de Sonora au Mexique.

Les sulfures (de fer ou troïlite, de sodium) ne constituent que des accumulations diffuses dans certains sols hydromorphes riches en matières organiques soufrées (mangroves). La boue est colorée en noir et a une odeur fétide caractéristique.

Les phosphates correspondent à des formes oxydées comme la strengite PO_4Fe , $2\text{H}_2\text{O}$, ou les taranites $(\text{PO}_4)_8\text{Al}_5\text{K}_3\text{H}_6$, $18\text{H}_2\text{O}$ ou $(\text{PO}_4)_8\text{Al}_5(\text{NH}_4)_3\text{H}_6$, $18\text{H}_2\text{O}$, la variscite PO_4Al , $2\text{H}_2\text{O}$, et paraissent correspondre à l'action d'engrais phosphatés sur des sols ferrallitiques riches en fer et alumine.

Les formes réduites sont la vivianite $(\text{PO}_4)_2\text{Fe}_3$, $8\text{H}_2\text{O}$ qu'on peut observer dans les horizons de gley des sols hydromorphes sous forme de nodules verdâtres.

2.3.2. Les silicates d'alumine hydratés sont essentiellement les minéraux argileux. Il s'agit de minéraux phylliteux constitués d'arrangements variés de couches tétraédriques où les tétraèdres sont organisés autour du silicium, et octaédriques où les octaèdres sont organisés autour de Al, Fe_{III} ou Fe_{II} et Mg. Les différents groupes de minéraux argileux ont été classés par CAILLERE et HENIN (1963) d'après l'épaisseur du feuillet élémentaire.

. Famille de la Kaolinite La formule du minéral peut s'écrire 2SiO_2 , Al_2O_3 , $2\text{H}_2\text{O}$ ou $\text{Si}_2\text{Al}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$. Le feuillet dont l'épaisseur est $d = 7,1 \text{ \AA}$ comprend une couche tétraédrique et une couche octaédrique (d'où la dénomination 1 : 1). Ni la couche tétraédrique siliceuse, ni la couche octaédrique alumineuse ne présente de substitution. Deux feuillets consécutifs sont reliés par des ponts hydrogène qui assurent la cohésion en formant des paquets de feuillets, ou cristallites, visibles au microscope électronique. Aucun cation ne peut s'introduire entre les feuillets. La capacité d'échange (1) est peu élevée (5 à 15 né/100 g); elle traduit l'existence de positions d'échange sur les bordures des cristallites.

(1) Capacité d'échange = somme de cations, exprimée en milliéquivalents, que peut fixer un sol. cf. chapitre 6.

La kaolinite bien cristallisée, qu'on peut trouver dans certains sédiments, est rare dans les sols. On observe fréquemment un minéral mal cristallisé dont le spectre de rayons X est caractérisé par l'absence de certaines raies et l'affaiblissement d'autres. Il s'agit de Fire-clay.

L'Halloysite est une variété de kaolinite présentant une couche d'eau insérée entre les feuillets, ce qui porte l'espacement de 7,1 à 10,1 Å. Cette eau peut être déplacée par chauffage de manière irréversible. Un peu d'eau peut subsister au hasard entre les feuillets, ce qui fait que l'espacement reste proche de 7,3 Å. C'est la métahalloysite. La capacité d'échange peut atteindre 40 né/100 g. Au microscope électronique, le produit se présente sous forme de tubes.

Les argiles de la famille de la kaolinite sont très fréquentes et très abondantes dans les sols ferrallitiques. Elles sont également abondantes dans les sols ferrugineux tropicaux. Dans les autres sols de la zone intertropicale, ces minéraux ont un caractère subordonné ou sont absents. Ils sont responsables de la faible capacité d'échange et du faible pouvoir de fixation des bases telles que calcium et potassium. Leur rapport silice/alumine est très proche de 2,0. La présence d'alumine libre, dans les sols ferrallitiques, peut entraîner une diminution notable de ce rapport.

. Famille de l'illite. Les minéraux ont un feuillet épais de 10 Å, avec une couche octaédrique ensermée entre deux couches tétraédriques.

La structure d'une illite est voisine de celle d'un mica. Dans la couche tétraédrique, environ 1 Si sur 6 est remplacé par Al. Il s'ensuit que des cations compensateurs sont nécessaires pour assurer l'équilibre des charges. Ce sont des ions K^+ (mais également Ca^{2+} ou Na^+ ou Mg^{2+}). Ces cations servent de ponts entre les feuillets; ils ne sont pas hydratés ni échangeables. La dimension des particules d'illite est beaucoup plus faible que celle du mica. La capacité d'échange est de l'ordre de 30 né/100 g. Le rapport silice/alumine est de l'ordre de 3,0.

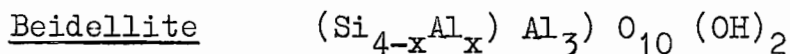
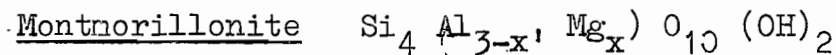
Dans certaines illites, une partie de l'aluminium est remplacée par du fer trivalent : d'où le nom d'illite ferrière. La séricite est un produit dont les relations avec l'illite paraissent certaines. Elle apparaît comme intermédiaire entre les feldspaths et la kaolinite. La glauconite appartient également à la famille de l'illite .

Dans les sols des régions tropicales humides, l'illite ne saurait être considérée comme un constituant habituel, si ce n'est dans un stade de jeunesse, ou bien par suite d'héritage (à partir de schistes par exemple). Dans les sols des pays subarides ou méditerranéens, l'illite est fréquente mais ne saurait être considérée comme caractéristique d'un type précis de pédogénèse.

. Famille des Montmorillonites (dans les ouvrages anglais ces produits sont dénommés smeectites)

Les minéraux de cette famille ont un feuillet d'épaisseur 10 Å, mais l'espacement entre deux feuillets est variable . Le feuillet présente trois couches : une octaédrique avec comme métaux Al, Fe ou Mg et deux couches tétraédriques. Les substitutions dans les deux types de couches peuvent être nombreuses et variées. La compensation des charges nécessitera la présence dans l'espace interfoliaire de nombreux cations hydratés .

Il existe des minéraux sans substitution ni dans la couche octaédrique, ni dans la couche tétraédrique. Avec Al, il s'agit de la pyrophyllite, avec Mg il s'agit du talc . En fait, ces produits ne sont pas des produits du sol et sont signalés ici pour mémoire. Les formules théoriques sont, pour les principaux minéraux :



Si tout ou une grande partie de l'aluminium de la beidellite est remplacé par du fer, on aura un produit nommé nontronite. Il est difficile de tracer une frontière précise entre les divers produits; en fait, il y a presque toujours des substitutions et dans la couche tétraédrique (Si par Al) et dans la couche octaédrique (Al ou Fe par Mg), ce qui fait que les montmorillonites, au sens large, constituent une famille assez homogène .

Les nombreuses substitutions, en couche tétra ou octaédrique, sont compensées par la présence de nombreux cations interfoliaires hydratés et échangeables. Leur présence fait que l'espacement est porté à 14 \AA environ. L'eau interfoliaire est déplaçable réversiblement, à moins de chauffer par trop l'échantillon. La capacité d'échange est de 80 à 120 mé/100 g. Le rapport silice/alumine est le plus souvent compris entre 3 et 4.

Les montmorillonites sont fréquentes dans les sols des pays subarides ou associés à un drainage défectueux. Certains sols rouges tropicaux en renferment des proportions notables. Elles constituent l'essentiel de la fraction argileuse des vertisols. Certains sols rouges des régions méditerranéennes (dérivés de basalte par exemple) en renferment de fortes proportions.

. Famille des vermiculites .

Les minéraux de cette famille ont un feuillet de 10 \AA , 2 couches tétraédriques et 1 couche octaédrique. Le cation dominant de la couche octaédrique est essentiellement bivalent (Mg^{2+} ou Fe^{2+}) ; la couche tétraédrique est fortement substituée avec une capacité d'échange de 100 à 150 mé. Les cations compensateurs interfoliaires sont du magnésium fortement hydraté, ce qui anène l'espacement à 14 \AA .

La vermiculite résulte de l'altération des micas; elle est présente dans des minéraux interstratifiés. Si elle est banale dans les sols des pays tempérés, il ne semble pas en être de même dans les sols des pays tropicaux où elle est rarement signalée, si ce n'est à la base de certains profils.

. Famille des chlorites .

Les minéraux de cette famille ont une équidistance stable de 14 \AA . Le feuillet comprend deux parties : la première est un mica trioctaédrique, la seconde un feuillet (1) où le magnésium non échangeable compense les déficits de charge de la couche de mica. La capacité d'échange est due aux valences libres des bords des cristaux et est de l'ordre de 30 mé/100 g.

Les chlorites sont rares dans les sols tropicaux.

(1) dit Brucitique par analogie avec celui de la Brucite $\text{Mg}(\text{OH})_2$

. Les Pseudo-chlorites ou chlorites gonflantes) .

Ces minéraux présentent une couche de montmorillonite avec une couche de $Mg(OH)_2$, $Al(OH)_3$ ou $Fe(OH)_3$ discontinue. Ces produits donnent aux rayons X les raies de la chlorite. Ils gonflent dans l'eau et ont une épaisseur variable. Ils sont encore peu connus dans les sols tropicaux .

Les minéraux interstratifiés sont des minéraux composés de plusieurs minéraux empilés suivant une loi ou sans loi. Des alternances régulières d'illite et de montmorillonite, de chlorite et de vermiculite sont fréquentes. Le nom d'hydronica désigne une alternance de mica et de vermiculite; anauxite, une alternance de kaolinite de silice .

2.3.3. Les oxydes et hydroxydes.

Divers produits sont présents dans les sols tropicaux en proportion variable sous forme d'oxydes et d'hydroxydes. Les dérivés du fer et de l'alumine sont très abondants; ceux du titane et du manganèse le sont beaucoup moins, bien que très constants .

Le fer et l'alumine ont beaucoup de points communs : ils forment des sesquioxides M_2O_3 , des hydroxydes $MOOH$ et $M(OH)_3$ présentant des structures identiques. Une différence fondamentale est la possibilité pour le fer d'exister aux valences 2 et 3, tandis que l'aluminium n'en possède qu'une. Dans la littérature, on trouve souvent une abondance de noms pour désigner les produits ferrugineux du sol (limonite, limnrite, turgite, xanthosiderite, hydrohénatite, etc); ces noms désignent en fait des produits impurs, des mélanges. La mise en oeuvre de techniques d'analyses modernes a réduit le nombre des constituants ferrugineux du sol au petit nombre qui suit.

Les oxydes.

Le corindon Al_2O_3 , la magnétite Fe_3O_4 ne sont pas formés dans les sols. Si on a pu les y identifier, ce n'est que par suite d'héritage. L'oxyde de fer Fe_2O_3 existe sous deux formes : hénatite et magnétite.

La magnétite Fe_2O_3 est un produit magnétique, cristallisant dans le système cubique . Il résulte de l'oxydation de la magnétite, ou bien de la déshydratation ménagée de la lépidocrocite.

Il est encore mal connu dans les sols où il semble associé aux phénomènes d'oxydo-réduction .

L'Hématite \times Fe_2O_3 est au contraire un produit banal des sols tropicaux. Il cristallise dans le système rhomboédrique; il se présente sous forme de petits cristaux rouge sombre ou gris foncé ou sous forme de poussière rouge vif. Sa densité est de 4,9 à 5,3, sa dureté 5 à 6 .

C'est un produit banal des sols tropicaux et il apparaît fréquent dans ceux qui sont assurés d'un bon drainage et se développent dans des climats à saison sèche très marquée. Il n'a pas de capacité d'échange et ne paraît pas jouer un rôle particulier dans le sol .

Les Hydroxydes : Deux familles d'hydroxydes de formule MO OH et $\text{M} (\text{OH})_3$.

Les hydroxydes MOOH peuvent se subdiviser en deux groupes α et γ qui diffèrent par un système de cristallisation assez différent.

Les hydroxydes α sont représentés par le diaspoire et la goethite. Le diaspoire α AlOOH est présent dans certaines bauxites qui ont été soumises à des compressions et chauffage. Ce n'est pas un produit des sols .

La Goethite α FeOOH est, au contraire, un minéral ferrugineux banal à la fois des sols des régions tempérées et tropicales. Sa couleur est brune à rouge, sa poussière jaune. Sa densité 3,8 à 4,4; la dureté 5 .

La goethite apparaît comme un constituant très courant des sols ferrallitiques développés sous des climats à longue saison des pluies. Mais on l'observe également dans les sols ferrugineux tropicaux et ceux des régions méditerranéennes. Dépourvu de capacité d'échange, ce produit ne paraît pas jouer de rôle particulier .

Les hydroxydes γ sont la boehmite et la lépidocrocite .

La Boehmite γ AlOOH est un constituant banal des bauxites du midi de la France. Il est assez peu connu dans les sols; il a cependant été identifié dans un certain nombre de cuirasses.

Sa genèse est alors expliquée comme une déshydratation de la gibbsite . La boehmite est un produit blanc, de densité 3,01 à 3,06, dureté 3,5 à 6,5. Pas de capacité d'échange .

La lépidocrocite γ FeOOH est encore peu connue dans les sols et les roches . Sa couleur est jaune orangé, sa densité 3,95, dureté 5 . On l'observe dans certains sols hydromorphes, rarement ailleurs .

La Gibbsite $\text{Al}(\text{OH})_3$ (autre nom : hydrargillite) n'a pas d'équivalent ferrugineux. Ce minéral est extrêmement fréquent dans les sols ferrallitiques dont il est un constituant banal. Il est absent des autres sols à sesquioxydes tels que ferrugineux tropicaux ou méditerranéens . Le minéral est blanc, dureté 2,5 à 3,5 densité 2,3 à 2,4. Il peut exceptionnellement se présenter sous forme de paillettes incolores, constituer de petits nodules ou des amas assez gros. Mais la plupart du temps, il est finement dispersé. La structure de ce minéral est phylliteuse, et résulte de la jonction par leurs arêtes d'octaèdres où Al occupe les centres et OH les sommets . La capacité d'échange est nulle .

Autres produits: quartz; oxydes et hydroxydes de titane et manganèse. Alors que les produits précédents présentent des teneurs souvent élevées (25% pour certains d'entre eux), les dérivés du titane et du manganèse dépassent rarement quelques pour cent, mais leur présence est très fréquente sinon constante.

Plusieurs auteurs ont signalé du quartz de néoformation dans certains sols ferrallitiques. Dans la très grande majorité des cas, le quartz des sols des régions intertropicale et méditerranéenne est hérité de la roche-mère .

Dérivés du Titane : Les produits titanés du sol sont essentiellement des oxydes. On trouve certes du Rutile TiO_2 , de l'Ilménite Fe Ti O_3 , mais il s'agit de produits hérités. L'altération de minéraux plus complexes comme le Sphène $\text{Ca, Ti}(\text{OH, F})_2\text{SiO}_4$ ou l'augite titanifère des basaltes, aboutit à l'anatase TiO_2 (système cristallin ^{différent} du rutile). On parle souvent de la Leucoxène, mais il s'agit de rutile micro-cristalline .

Les sols tropicaux et plus spécialement les sols ferrallitiques accumulent un peu de titane (0,5 à 3% dans les sols dérivés de roches acides, 2 à 6% dans les sols dérivés de roches basiques). Dans certains cas exceptionnels, on atteint 18% (aux îles Hawaï).

Dérivés du Manganèse : Les produits manganésifères du sol sont peu nombreux, malgré l'extrême diversité des combinaisons possibles résultant des nombreuses valences du métal. Le produit le plus courant est la pyrolusite MnO_2 , poudre noire, qui existe dans de nombreux sols, et surtout dans les sols dérivés de roches volcaniques. Ce produit participe à l'élaboration de certaines cuirasses. Sur le terrain, il est possible de le mettre en évidence facilement; il fait dégager l'oxygène de l'eau oxygénée. Mais il n'est pas seul à communiquer au sol une couleur noire .

2.4. Les produits amorphes

La définition de ces produits par rapport aux produits cristallisés est plutôt négative, puisqu'on les définit par des propriétés qu'ils n'ont pas, plutôt que par celles qu'ils ont .

Les produits amorphes sont donc des produits non cristallisés. Ils n'ont pas de diagramme X. Ils ont un comportement thermique différent : l'eau de constitution (essentiellement celle qui provient des OH) part à très basse température, etc. Ils n'ont pas de formule de constitution définie. Par contre, ils sont généralement plus riches en eau que les produits cristallisés et ont vis-à-vis de celle-ci un comportement assez particulier. Ils ont une surface spécifique plus grande que les produits cristallisés et on leur attribue une capacité d'échange également plus élevée. Ils réagissent beaucoup mieux à l'acide phosphorique que les produits cristallisés. Les produits amorphes, s'ils sont plus difficiles à étudier et caractériser que les produits cristallisés représentent donc une fraction beaucoup plus " active ". On peut diviser les produits amorphes en deux catégories: les oxydes et hydroxydes d'une part, les silicates hydratés d'autre part .

Les Oxydes et Hydroxydes. Un certain nombre d'entre eux sont suffisamment abondants et connus. Ils ont un nom et leurs propriétés sont étudiées depuis longtemps.

L'opale $\text{SiO}_2, n \text{H}_2\text{O}$ avec un n compris entre 2 et 15. En première approximation, il s'agit d'un produit amorphe : pas de diagramme X, départ important d'eau à basse température. Actuellement, les spécialistes pensent qu'il s'agit de produits cryptocristallins. La calcédoine est constituée de fibres où des cristaux de quartz alternent avec des couches d'opale. Dans chaque fibre, les empilements s'effectuent sous une forme hélicoïdale.

La silice amorphe est présente dans le sol lorsqu'il y a hydrolyse de minéraux silicatés en climat sec, insuffisamment d'eau pour la dissoudre ou de produits alcalins pour former des silicates. L'opale est également le constituant des phytolites, résidu siliceux des tissus végétaux.

Les hydroxydes de fer ou stilpnosidérite $\text{Fe}_2\text{O}_3, n \text{H}_2\text{O}$ sont fréquents dans les sols et dans les roches. Il en est de même pour les hydroxydes d'aluminium ou $\text{Al}_2\text{O}_3, n \text{H}_2\text{O}$ dénommés cliachite ou alunogel. Ces matériaux sont présents dans de nombreux sols et n'ont pas été recherchés systématiquement jusqu'à présent. Il n'est pas douteux que les hydroxydes amorphes sont des constituants ordinaires des sols de la zone inter-tropicale.

Les silicates de fer et alumine amorphes $^x\text{SiO}_2, ^y\text{Fe}_2\text{O}_3, n \text{H}_2\text{O}$ Hisingérite, $^x\text{SiO}_2, ^y\text{Al}_2\text{O}_3, n \text{H}_2\text{O}$ allophane. Ces matériaux ont été identifiés depuis fort longtemps puisqu'on en parle depuis 1816. Mais ce n'est qu'assez récemment que leur étude a pris une certaine ampleur. Ils ont été reconnus dans les îles du Pacifique, en Amérique du Sud, Centrale, du Nord, en Afrique, etc... Ils sont liés, très souvent, à des matériaux vitreux et tout spécialement à des cendres d'origine volcanique. Les techniques d'étude se sont perfectionnées, dans le domaine chimique. L'utilisation des techniques thermiques, des rayons X, l'introduction de spectrographie dans l'Infra-Rouge a beaucoup contribué à améliorer leur connaissance. Malgré cela, la connaissance intime est encore peu avancée, malgré les travaux de chercheurs comme AOMINE et YOSHINAGA, 1953; BIRRELL et FIELDER, 1952 etc...

Les matériaux amorphes ont des rôles très variés dans les sols. Ils sont responsables d'un comportement très particulier vis-à-vis de l'eau qui est beaucoup plus abondamment retenue que par les argiles, mais aussi de manière plus lâche. Ils rendent difficile toute analyse mécanique. Ils provoquent une augmentation de la capacité d'échange. Ils ont une forte surface spécifique.

3.3. BIBLIOGRAPHIE de la 2ème Partie .-

- AUBERT (G.), BOULAIN (J.) - 1967 - La pédologie. Coll. "Que sais-je", N° 352.
PUF, Paris, 128 p.
- AOMINE (S.), YOSHINAGATA (N.) - 1955 - Clay minerals of some well drained volcanic ash soils in Japan. Soil. Sci. 79, 349-358.
- BIRRELL (K.S.), FIELDS (M.) - 1952 - Allophane in volcanic ash soils. J. Soil. Sci. 3, 156-166.
- CAILLERE (S.), HENIN (S.) - 1963 - Mineralogie des argiles. Masson, Paris, 356 p.
- DEMOLON (A.) - 1960 - La dynamique du sol. 5e éd. Dunod, Paris, XXII, 520 p.
- DHOORE (J.L.) - 1964 - La carte des sols d'Afrique au 1/5.000.000 mémoire explicatif. Lagos, C.C.T.A. Projet conjoint 11, 209 p.
- DUCHAUFOR (P.) - 1965 - Précis de Pédologie. 2e. éd. Masson, Paris, 482 p.
- ERHART (H.) - 1933 - Traité de Pédologie. Strasbourg.
- FLAIG (W.) - 1966 - The chemistry of humic substances in : The use of isotopes in soil organic matter studies. FAC/IAEA. Technical meeting. 1963. Brunswick - Volkenrode. Pergamon Press, Oxford, London, Edinburg (etc.) pp. 103-127.
- GRIM (R.) - 1953 - Clay mineralogy. Mc Graw-Hill Book Co, New York, XII - 384 p.
- JOFFE (J.S.) - 1949 - Pedology. Pedology Publ., New-Brunswick, N.J. 662 p.
- KONONOVA (M.M.) - 1961 - Soil organic matter. Pergamon Press, Oxford, London, New York (etc.), 450 p.

- KUBIENA (W.L.) - 1953 - The soils of Europe. Madrid.
- LACROIX (A.) - 1922-1923 - Minéralogie de Madagascar. Challamel, Paris, 3 tomes 624 + 694 + 450
- MAIGNIEN (R.) - 1966 - Compte-rendu de recherches sur les latérites. UNESCO Paris. 155 p.
- MARGULIS (H.) - 1963 - Pédologie générale. Gauthier-Villars, Paris, 120 p.
- MILLOT (G.) - 1964 - Géologie des argiles. Masson, Paris, 500 p.
- ROBINSON (G.W.) - 1949 - Soils. 3 rd. ed. Th. Murby, London, XXI, 573 p.
- SCHEFFER (F.), ULRICH (B.) - 1960 - Humus and humus Düngung. Bd1: Morphologie, Biologie, Chemie und Dynamik des Humus. 2° Anpl. F. Enke Verl., Stuttgart, VIII - 266 p.
- SEGALEN (P.) - 1964 - Le Fer dans les sols. Init. Doc. Techn. ORSTOM n° 4 Paris, 150 p.
- SEGALEN (P.) - 1965 - Les produits alumineux dans les sols de la zone tropicale humide. Cah. ORSTOM sér. Pédol.III, 2, 149-176 et III, 3, 179 - 205 .
- STEPHENS (C.G.) - 1962 - A manual of Australian soils. 3rd éd. C.S.I.R.O., Melbourne, 62 p.
- U.S.D.A. - 1960 - Soil Classification. A comprehensive system. 7 th approximation. Soil Survey Staff, Soil conservation service, Washington, 265 p. multigr.
- VILENSKII (D.G.) - 1963 - Soil Science. 3è éd. Trad. Israel Jerusalem, 488 p.

3ème P a r t i e

La caractérisation du sol

La caractérisation du sol est une opération délicate, souvent fort longue pour être bien faite. Elle relève d'un ensemble de techniques très différentes qu'on ne peut mettre en oeuvre dans le même temps et qui le sont souvent par des personnes différentes.

Il faut tout d'abord opérer une caractérisation très précise du lieu où est observé le sol, définir son environnement: par ses données climatiques, la végétation qu'il supporte, la nature de la roche-mère, la géomorphologie qui commande, dans une certaine mesure, le drainage, l'abondance des roches, l'érosion.

Dans un deuxième temps, il faut décrire soigneusement le sol horizon par horizon et donner les caractéristiques essentielles qui sont la couleur, la texture, la structure, la porosité, la consistance, la cohésion, l'enracinement etc.

La description du sol, effectuée sur le terrain doit être complétée par des déterminations variées au laboratoire. Des mesures physiques permettent de donner des valeurs chiffrées aux appréciations du terrain en ce qui concerne la texture et la structure. On précise le comportement du sol vis-à-vis de l'eau. Le complexe absorbant est étudié à son tour (capacité d'échange, bases échangeables, degré de saturation). Les propriétés électro-ioniques telles que réaction et potentiel d'oxydo-réduction font l'objet de mesures. La détermination des minéraux argileux, des oxydes et hydroxydes, des sels contribue également à la connaissance des sols, par mise en oeuvre de techniques physiques modernes .

Mais, comme le sol est également un milieu vivant, sa caractérisation biologique fait apparaître une richesse considérable à la fois dans le domaine de la microflore (bactéries, champignons, etc) microfaune (protozoaires, nématodes) ou faune (acariens, termites, fourmis etc...)

La caractérisation des sols est donc une opération longue et complexe. Une conclusion sur chaque horizon et sur chaque sol ne peut donc intervenir immédiatement. Les formulations qui ont pu être faites sur le terrain doivent être complétées et confirmées par celles du laboratoire.

C h a p i t r e 4

Données concernant l'environnement

- 4.1.- Généralités
- 4.2.- Végétation et système de culture.
- 4.3.- Roche-mère et matériau originel
- 4.4.- Géomorphologie
- 4.5.- Relief et pentes
- 4.6.- Drainage
- 4.7.- Inondation
- 4.8.- Présence de pierres
- 4.9.- Présence de roches
- 4.10- Erosion

4.1.- Généralités .- Il est important de préciser toutes les données relatives au milieu dans lequel s'insère le sol étudié. En effet, de tous les facteurs de formation du sol dépendent son développement et son évolution. De plus, ces facteurs orientent le choix des méthodes à mettre en oeuvre lors de la mise en valeur du sol.

Un certain nombre de données comme les données climatiques ne peuvent, bien entendu, être obtenues sur place; elles doivent faire l'objet d'une étude, avant le départ sur le terrain, qui se traduira par la connaissance des valeurs suivantes : chiffres mensuels de la pluviométrie, et extrêmes observés; températures minima, maxima, moyennes mensuelles et annuelles. On dresse des graphiques tels que le diagramme ombro thermique de GAUSSEN; on calcule l'évapotranspiration potentielle, et si cela apparaît utile pour la comparaison avec les régions voisines, on calcule les indices climatiques.

Sur les cartes on note soigneusement les altitudes dont les effets interviennent dans l'appréciation des climats. L'augmentation de l'altitude se traduit souvent par celles des teneurs en matières organiques du sol. Il y a donc lieu de distinguer les sols de montagne des sols des régions basses. L'altitude est donnée en valeur absolue et en mètres. On peut indiquer la cote relative lorsqu'on travaille sur des terrasses alluviales . (terrasses + 7, + 23m etc...).

Mais à ces données fournies par les services météorologiques , par l'étude des cartes s'en ajoutent d'autres dont certaines ont pu déjà faire l'objet de travaux sur le terrain, de cartes thématiques (cartes de végétation, cartes géologiques etc...). Elles sont, bien entendu, largement utilisées, mais complétées par de nombreuses observations particulières sur le terrain et concernant la géomorphologie, la végétation, le drainage, l'abondance des roches, l'érosion etc

4.2. - Végétation ou système de culture .

Sans aller jusqu'à une étude phytosociologique, un certain nombre de caractéristiques peut être précisé :

- type de formation : forêt ombrophile (~~decidue~~), xérophile etc; savane, steppe, prairie; plantation arbustive, champs cultivés, etc. et leurs hauteurs .
- Strate herbacée :

0 - 10 cm	10 - 50 cm	-	50 - 100 cm	>	100 cm
prostrée	inférieure		moienne		supérieure
- Strate ligneuse :

0,25 cm	0,25 - 2 m		2 - 8 m	>	8 m
prostrée	buissonnant		arbustive		arborée
- Espèces dominantes et caractéristiques. On indique dans l'ordre : les arbres, les arbustes, puis les espèces herbacées annuelles et vivaces. Les noms botaniques, les noms vernaculaires, sont fournis .
- Aspect physionomique des peuplements. On signale en particulier si les espèces végétales sont de belle venue, ou, au contraire, dégradées pour des raisons diverses (feux, nappe phréatique, présence d'un niveau imperméable, déficit hydrique, cultures, etc..);

- Degré de recouvrement du sol. Cette donnée permet d'apprécier les possibilités d'ensoleillement à la surface du sol; le rôle du couvert végétal contre l'érosion; le renouvellement du stock organique, etc.
- On précise les relations entre la végétation et le type de matière organique que recouvre le sol (mor, moder, mull, etc..)

4.3. - Roche-mère et matériau originel.

L'ensemble des données concernant la roche-mère et le matériau originel est d'une grande influence sur l'évolution des sols. Aussi, elles doivent être précisées le mieux possible. En particulier, il est indispensable d'indiquer s'il y a ou non des relations entre la roche fraîche sous-jacente et le matériau originel. Des apports secondaires peuvent modifier sensiblement les caractéristiques du matériau et doivent être signalés. Les caractéristiques à considérer sont les suivantes :

. Nature des roches - On indique le nom de la roche, et précise suivant les cas : son état de cristallisation s'il s'agit d'une roche éruptive, ou sa friabilité, s'il s'agit d'une roche sédimentaire; sa richesse en certains éléments déterminants pour la pédogenèse : cations alcalino-terreux (calcium, magnésium, sodium), minéraux noirs riches en fer, en magnésium etc ...

. Gisement . Cette information permet de préciser les conditions de drainage des eaux de percolation. On indique en particulier le pendage des roches, la présence ou l'absence de lignes de moindre résistance, les diaclases et leur orientation. Ainsi, un schiste à gisement horizontal limite la circulation verticale des eaux tandis que des schistes redressés l'accélèrent .

. Mode d'altération : Il n'y a pas toujours de relations de cause à effet entre le type d'altération des roches observées et la pédogenèse actuelle. Ce fait est particulièrement fréquent en régions tropicales où de nombreux sols se développent sur d'anciens produits d'altération. Il est donc important de préciser à quel type d'altération les roches ont été soumises: arénisation, argilisation, ferrallitisation, etc. On indique également les matériaux qui ont échappé à cette altération : minéraux ou débris de roches .

. Remaniements, contaminations. L'observation du matériau originel fait fréquemment apparaître des remaniements, un triage des matériaux, des apports d'éléments étrangers qui rendent compte des différents mécanismes qui ont présidé à la mise en place. Ces données correspondent soit à des enrichissements relatifs de produits résiduels par entraînement d'autres matériaux, soit à la présence d'éléments étrangers (débris de roches voisines, cendres volcaniques, de poteries, charbon de bois, etc...)

4.4. - Géomorphologie -

Le modelé est souvent en relation avec le type de sol . Il y a souvent des relations très étroites entre les types de sol et leur position dans le modelé. Les données à fournir sont les suivantes :

. forme du modelé : par exemple collines, modelé monoclinal, plateau, dépression, etc .

Ainsi les cuirasses ferrugineuses se mettent généralement en place sur les surfaces subhorizontales, les sols ferrallitiques sont associés à des collines; les vertisols s'individualisent le plus souvent en bordure des dépressions .

. position dans le modelé : En région forestière, les sols en sommet de pente sont généralement rouges; ils sont jaunes le long des pentes, pour devenir gris en bas de pente .

. situation relative de la forme du modelé au lieu de l'observation : cette donnée permet d'interpréter parfois la pédogenèse des sols qui s'étagent sur les différentes formes du modelé et qui peuvent être d'âge différent .

Par exemple, en Haute-Volta sur les plateaux, on observe des sols de cuirasse ferrallitique très anciens; sur les glacis, des sols ferrugineux tropicaux actuels. Souvent même, cette position relative permet d'expliquer le développement de certains types de sols. Ainsi, les vertisols observés en bordure des cuvettes des régions Ouest de Haute-Volta doivent leur origine à la concentration du calcium et magnésium qui drainent des reliefs plus élevés .

évolution actuelle du modelé : Cette caractérisation est à relier aux processus d'érosion. S'il s'agit d'un modelé jeune ou rajeuni pour des causes diverses (disparition d'un seuil, déboisement, etc), il y aura tendance au décapage des horizons du sol. S'il s'agit d'une forme sénile, il peut y avoir tendance au remblaiement. On indique également si les causes de ces mécanismes sont à rattacher à des influences géographiques générales ou à des causes locales, comme celle de l'homme.

4.5. - Relief et Pentes .-

4.5.1 - On distingue le relief général du microrelief de la surface du sol. La forme d'un paysage se caractérise par l'allure générale du relief.

On peut reconnaître 4 classes de paysages :

- . accidenté : région constituée d'un ensemble de collines à surfaces subhorizontales réduites et à pentes supérieures à 25%.
- . ondulé : région constituée par un ensemble de collines à surfaces horizontales réduites et à dominance de pentes de 8 à 25%.
- . largement ondulé : ensemble de collines ou de plateaux à grandes surfaces subhorizontales, coupées par des pentes qui varient généralement de 8 à 25%.
- . plan : paysage constitué par des unités horizontales et subhorizontales dont les pentes ne dépassent pas 8%.

Il est également possible de classer le relief par rapport aux possibilités d'écoulement des eaux superficielles.

- . nul ou concave : surfaces à drainage superficiel très lent ou nul.
- . subnormal : surfaces plus ou moins planes à drainage superficiel lent.
- . normal : surfaces ondulées à drainage superficiel moyen.
- . excessif : surfaces accidentées à drainage superficiel rapide.

Le microrelief concerne les variations de formes que l'on observe à la surface du sol. Il peut s'agir de microreliefs naturels ou artificiels. On note alors :

- les dimensions du microrelief : longueur d'ondes et amplitudes;
- le réseau des fentes de retrait, caractérisé par la forme et la taille du réseau principal; l'ouverture des fentes, l'aspect

- des bords de fentes; le caractère d'un réseau secondaire éventuel et son recoupement avec le réseau principal.
- les effondrements dont on précisera la forme, la taille, la profondeur, les bordures, la situation dans le microrelief, l'alignement, l'orientation .
 - les microreliefs naturels : gilgai = succession de petites buttes et de petites zones déprimées dues à des mécanismes de gonflement et de rétraction de certaines argiles sous l'action alternante de l'humidité et de la dessiccation; tortillons de vers de terre formant des petites buttes aux pieds de touffes de graminées; griffes d'érosion; termitières diverses; fentes de retrait; bombements et buttes liées à la végétation .
 - les microreliefs artificiels : puits à parois non consolidées, partiellement effondrées; anciens fossés de drainage ou d'irrigation; levées artificielles; déblais; tumuli; etc .

4.5.2.- La pente induit la circulation des eaux sur et à l'intérieur des profils. Cette donnée est donc importante. Les indications doivent porter sur :

- la pente elle-même en degrés ou en % en signalant s'il s'agit d'une pente simple ou d'une pente complexe et alors en donner les différents éléments.

- sa longueur; s'il y a ruissellement, les phénomènes d'érosion apparaissent après une certaine longueur de pente.

- son exposition; les pentes à l'Ouest sont souvent plus arrosées que celles à l'Est.

- la forme : plane, convexe, concave. La connaissance de ces éléments oriente les types d'aménagements et de protection contre le ruissellement. Si la pente est convexe, il sera facile d'évacuer les surplus d'eau. Il n'en sera pas de même pour une pente concave. Il faut alors étudier le module de canaux en conséquence .

4.6. - Drainage .

Le drainage du sol se réfère à la manière dont les excès d'eau sont évacués à la fois à la surface des sols et au sein des profils. On distingue généralement le drainage externe, qui exprime la façon selon laquelle l'eau est évacuée en surface,

du drainage interne qui caractérise les possibilités de percolation de l'eau à travers le profil . On peut également apprécier la perméabilité des différents horizons par des mesures sur le terrain, et de la synthèse des données précédentes , déduire des classes de drainage .

Le drainage externe fait seul appel aux données d'observation directes. Il est sous la dépendance à la fois de la pente et de la porosité du sol, c'est à partir de ces données que l'on définit les six classes de drainage suivantes :

1. Nul. L'eau accumulée en surface ne s'évacue pas par ruissellement. Il y a stagnation dans ou sur le sol . L'infiltration est très réduite. L'eau ne s'évacue que par évaporation .

2. Très lent . L'eau stagne en majeure partie à la surface du sol. Il n'y a pas de ruissellement. L'évacuation se fait en partie par pénétration lente dans le sol et en partie par évaporation .

3. Lent . Le ruissellement est faible mais sensible. L'eau accumulée en surface s'évacue lentement. Elle se maintient un certain temps à la surface et pénètre en partie dans le sol.

4. Moyen . L'eau stagne peu en surface, elle s'évacue à la fois par ruissellement et par infiltration .

5. Rapide. L'eau de précipitation s'évacue en grande partie par ruissellement aussi rapidement qu'elle arrive à la surface du sol .

6. Très rapide. Toute l'eau accumulée s'évacue par ruissellement. L'infiltration est réduite ou nulle. Il en résulte une érosion plus ou moins sévère .

Naturellement, lorsque cela est possible, on indique l'état du drainage naturel et celui du drainage artificiel après assainissement .

4. 7. - Inondation.

Il peut y avoir inondation de la surface étudiée soit par suite d'une évacuation défectueuse des eaux accumulées, soit par suite d'un apport excessif d'eau par débordements d'une rivière ou ruissellement accéléré des zones amont. On distingue les sols :

1. Longuement inondés; l'eau stagne pendant la majeure partie de l'année.
2. Périodiquement inondés; l'inondation est limitée à quelques mois chaque année .
3. Parfois inondés; l'inondation n'a lieu qu'en années humides.
4. Exceptionnellement inondés; l'inondation ne se réalise qu'en années exceptionnelles par débordement ou rupture de digues.
5. Jamais inondés; à l'abri de toute accumulation d'eau en surface .

4.8. Présence de pierres.

Par pierres, on entend des matériaux dont le diamètre moyen est supérieur à 20 cm et qui ne sont pas ancrées profondément dans le sol. Ces accidents doivent être obligatoirement notés. Ne pas les mentionner rend les cartes pédologiques inexplicables . On exprime la présence de pierres en indiquant le pourcentage de surface couvert par ces matériaux. Les différentes classes sont définies en tenant compte des incidences pratiques sur l'emploi des machines agricoles . Ces classes sont les suivantes :

1. Pas de pierres ou trop peu de pierres pour gêner les pratiques culturales. Elles couvrent moins de 0,1% de la surface totale.

2. Suffisamment de pierres pour gêner, mais non pour rendre impossible les pratiques culturales. Les pierres sont dispersées à la surface du sol à des distances variant de 10 à 30 mètres, et occupent 0,1 à 1% de la superficie totale .

3. Suffisamment de pierres pour rendre impossible les cultures. Néanmoins, le sol peut être exploité en prairie de fauche ou en pâturage amélioré, si les autres caractéristiques du sol le permettent .

4. Suffisamment de pierres pour rendre impossible toute utilisation de machines à l'exception de machines très légères ou des instruments à main. Pâtures naturelles ou forêts, si les conditions du sol le permettent .

5. Suffisamment de pierres pour rendre impossible toute utilisation de machines; vaines pâtures, forêts .

6. Plus de 90% de la surface est recouvert de cailloux; aucune utilisation agricole possible .

Ces différentes classes peuvent être également utilisées pour les sols couverts de cailloux, ces derniers ayant un diamètre moyen variant de 5 à 20 cm. Les conséquences pour les façons culturales sont moins prononcées .

4.9. Présence de roches.

Le terme " roche " est utilisé arbitrairement pour désigner les formations indurées affleurantes, profondément ancrées dans le sol. Six classes sont définies en tenant compte de la surface couverte et de la distance séparant ces matériaux qui règle les possibilités d'intervention des instruments mécaniques :

1. Pas de roche : moins de 2% de la surface est recouvert par les roches.

2. Peu de roches : 2 à 5% de la surface est occupé par des roches distantes en moyenne de 35 à 100 mètres .

3. Assez peu de roches : 2 à 10% de la surface est occupé par des affleurements distants en moyenne de 10 à 35 mètres.

4. Moyennement rocheux : les roches couvrent 10 à 50% de la surface totale. Elles sont distantes en moyenne de 3,5 à 10 mètres .

5. Beaucoup de roches : la superficie couverte par les roches distantes de moins de 3,5 mètres est de 50 à 90% de la surface .

6. Rocheux: plus de 90% de la surface est couvert par des roches .

Lorsque les sols sont à la fois pierreux et rocheux, il faut indiquer séparément les deux classes .

4.10. Erosion.

Les marques de l'érosion sur le sol sont décrites en détail car elles permettent de préciser les types d'aménagement compatibles avec l'équilibre du milieu. On distingue les deux types classiques d'érosion : par le vent et par l'eau. On indique s'il y a décapage ou apports et on signale les formes et les horizons

atteints, la superficie couverte .

4.10. Erosion éolienne.

. Déflation . Il s'agit de l'enlèvement par le vent des matériaux fins superficiels. On signale l'épaisseur des horizons atteints, la présence éventuelle de matériaux résiduels (cailloux, sables grossiers); s'il y a rabotage, la forme des stries à la surface du sol .

. Accumulation . On indique la nature des matériaux accumulés, leur épaisseur; les relations entre les zones d'accumulation et certains facteurs du milieu (accumulation au pied des buissons par exemple); la forme des accumulations (barchanes , ensablement diffus, dunes diverses).

4.10.2. Erosion hydrique.

. Décapage . Comme pour l'érosion éolienne, on signale l'épaisseur des tranches de sol entraînées au loin, les différents horizons atteints .

. accumulation . On fournit les mêmes données que pour l'érosion éolienne; épaisseur, nature des matériaux accumulés, superficie, mode et répartition du recouvrement .

Une attention particulière doit être portée aux formes de l'érosion, les 7 suivantes ont été reconnues :

. Par battement . (splash en anglais). La goutte d'eau qui frappe le sol fait éclater les agrégats. Les constituants les plus fins sont projetés parfois à plusieurs dizaines de cm, leur gangue terreuse reste sur place. On a ainsi un tri des différents éléments texturaux du sol qui donne à la surface de ce dernier un aspect battant, de forme souvent réticulée, très caractéristique .

. En nappe . Une mince tranche de sol se trouve décapée sur une grande surface. Ce mécanisme donne également un aspect superficiel réticulé .

. En nappe ravinante . Des tranches de sol de plusieurs centimètres d'épaisseur sont entraînées en masse, avec formation de petits " à pic " en amont et sur le côté . Il en résulte la formation d'un microrelief " en escaliers " .

. En rigoles . De petites rigoles que l'on nomme souvent aussi griffes d'érosion, sont creusées par l'eau dans le sol. Leurs dimensions en largeur et profondeur varient de quelques centimètres à quelques dizaines de mètres .

. En ravins . Il s'agit d'une forme accusée de la précédente. Les ravins ont plusieurs mètres de profondeur, certains atteignent plusieurs dizaines de mètres .(Généralement, pour définir les limites de dimension entre les rigoles et les ravins, on s'appuie sur la possibilité ou l'impossibilité de les traverser à l'aide du matériel agricole tracté).

. Par mouvements de masse . Dans ce type d'érosion, toute une masse de sol sur une grande épaisseur, se décroche et glisse le long de la pente. Une forme particulière de l'érosion par mouvements de masse est l'érosion " Lavaka ⁽¹⁾ ", caractéristique des Hauts Plateaux Malgaches .

. Par chenaux souterrains. L'eau de ruissellement qui s'engouffre en profondeur par le canal d'une fente de retrait creuse des chenaux souterrains à l'intérieur du sol. Il en résulte des effondrements discontinus caractéristiques .

En plus des formes de l'érosion, on indique les dimensions des griffes (largeur, longueur, épaisseur); le pourcentage de surface érodée, les relations avec certains facteurs (déboisement, construction de route, travail du sol, etc...)

..../...

(1) Lavaka : mot malgache signifiant excavation

Chapitre 5

Description des profils

- 5.1. Epaisseur et limites des horizons
- 5.2. Couleur
- 5.3. Matière organique et calcaire
- 5.4. Texture
- 5.5. Structure
- 5.6. Porosité
- 5.7. Consistance
- 5.8. Cohésion
- 5.9. Enracinement
- 5.10. Formations particulières

Le sol se définit tout d'abord par son profil qui se caractérise par une morphologie qu'il faut décrire. Cette description contribue à l'identification du sol qui doit être analytique et complète. L'énumération des caractéristiques de la morphologie montre qu'il s'agit là d'une opération longue et complexe qui demande beaucoup de temps, même pour un pédologue entraîné. Il est donc pratiquement impossible d'effectuer ce travail sur tous les profils. On limite l'observation exhaustive à ceux qui sont considérés comme représentatifs des unités cartographiées. L'étude de leur extension se fait à l'aide d'observations plus rapides à la sonde .

La première opération consiste à reconnaître les différents horizons constituant le profil, à préciser comment s'effectue le passage d'un horizon à l'autre, à décrire successivement chaque horizon en commençant par l'horizon supérieur .

Pour reconnaître les horizons, on s'appuie sur plusieurs critères : la couleur, la teneur en matière organique, la texture, la structure, la présence éventuelle de certaines caractéristiques (teneurs en carbonates de calcium, en sesquioxydes, en sels divers, etc.)

5.1 - Epaisseur et limites des horizons .

On note l'épaisseur des horizons en indiquant en centimètres de haut en bas la profondeur des différentes limites .

La limite supérieure est la surface du sol minéral. L'épaisseur des différents dépôts organiques superficiels (litière) est notée de bas en haut à partir de la surface du sol minéral en ajoutant le signe moins devant le nombre de centimètres .

Les limites entre les horizons diffèrent en netteté et régularité. La distinction dépend partiellement du contraste entre les horizons et partiellement aussi de la netteté de la limite ou de l'importance de la transition entre un horizon et le suivant :

. netteté. Cette donnée s'appuie sur la largeur de la transition. On définit les classes suivantes :

- passage brutal : la transition est inférieure à 2,5 cm .
- passage distinct : la transition a de 2,5 cm à 6 cm.
- passage graduel : la transition se situe entre 6 et 12,5 cm.
- passage progressif (ou diffus) : la transition est supérieure à 12,5 cm .

. régularité . Cette donnée concerne la forme de la transition. Elle peut être :

- régulière : la limite est pratiquement parallèle à la surface du sol .
- ondulée : la limite constitue des poches jointives dont la largeur est supérieure à la profondeur .
- irrégulière : la limite constitue des poches jointives.
- discontinue; il s'agit de parties d'horizons non jointives .

5.2. Couleur .

La couleur des horizons peut être uniforme ou bariolée. S'il y a bariolage, on observe des taches plus ou moins distinctes de formes diverses. On décrit le bariolage en indiquant la couleur de fond et la ou les couleurs des taches principales, puis on décrit le dessin des taches. La couleur est déterminée d'après un code (cf. plus loin).

Le dessin des taches est décrit par quatre ensembles de notation (contraste, nombre, dimensions, forme).

1. le contraste peut être :

- vague : les taches ne sont reconnaissables que de fort près.
- distinct : les taches se distinguent facilement de la couleur de fond .
- frappant : les taches sont nettement individualisées et se dégagent nettement de la couleur de fond .

Il peut arriver parfois que l'horizon ne soit qu'un mélange de taches .

2. Le nombre se détermine par appréciation grossière du pourcentage de surface verticale couverte par les taches. Cette opération peut être facilitée en comparant les faits à des modèles schématiques .

Il y a peu de taches lorsqu'elles occupent moins de 2% de la surface. Les taches sont assez nombreuses lorsqu'elles couvrent 2 à 20% de la superficie totale. Il y a beaucoup de taches lorsqu'elles couvrent plus de 20% de la surface.

- Les dimensions se réfèrent au diamètre moyen des taches

Elles sont petites lorsque le diamètre est inférieur à 5 mm, moyennes lorsque le diamètre se situe entre 5 et 15 mm, grosses lorsqu'elles ont plus de 15 mm de diamètre .

- La forme des taches peut être diverse. On peut observer des taches circulaires, des marbrures, des stries, des langues. Ces différents dessins peuvent être discontinus; ils sont parfois jointifs et forment alors une trame .

Détermination des couleurs .

Les couleurs sont déterminées en se référant à un code de couleur. L'appréciation directe est à déconseiller car la précision varie avec chaque individu et les termes employés sont trop subjectifs. Deux codes de couleurs peuvent être employés : le code expolaire de Taylor et Cayeux et le Munsell Soil Color Chart. Ce dernier utilisé par la majorité des pédologues dans le monde .

Le " Munsell Soil Color Chart " comprend 175 cartons colorés ou " chips ". Ces cartons sont groupés systématiquement d'après leur notation " Munsell " sur des planches assemblées dans un carnet à feuilles mobiles. Les notations consistent en l'arrangement par gamme ("hue"), valeur ("value") intensité ("chroma").

. La gamme est la couleur spectrale dominante. Elle a rapport à la longueur d'onde dominante de la lumière. Toutes les couleurs d'une même planche ont la même gamme indiquée par un symbole dans le coin supérieur droit. Le symbole pour la gamme est représenté par l'initiale majuscule de la couleur (en anglais) :

R	pour rouge	} précédé d'un nombre de 0 à 10
YR	pour jaune-rouge (orange)	
Y	pour jaune	
et N	pour neutre	

. La valeur se rapporte à la luminosité relative de la couleur. Elle est fonction (approximativement de la racine carrée) de la quantité totale de lumière. Il s'agit en fait de l'addition de différents types de gris à la gamme .

Les symboles de la valeur sont représentés par des chiffres arabes, à gauche de la planche en face de chaque rang de cartons. Verticalement et de bas en haut, les couleurs deviennent successivement plus claires par bonds visuellement égaux. Leur valeur augmente. La notation s'étend de 0 pour le noir absolu, à 10 pour le blanc. Une valeur 6 est légèrement moins foncée, 60% de la distance de noir à blanc et à une distance égale entre les valeurs 5 et 7 par exemple .

. L'intensité (parfois appelée aussi " saturation ") est la pureté relative ou la force, de la couleur spectrale. Elle augmente de gauche à droite avec une tonalité grise décroissante. La notation de l'intensité apparaît horizontalement en bas de la planche sous chaque colonne de cartons. Elle est symbolisée par des chiffres arabes de 0 à 8.

L'ordre à respecter dans la notation est : gamme, valeur, intensité. Les chiffres de la valeur et de l'intensité sont séparés par une barre oblique, par exemple : 2,5 YR 4/6 = rouge.

Lorsque l'on note les couleurs, il est indispensable d'indiquer l'humidité de l'horizon étudié. En effet, la couleur change avec la teneur en eau . Ce phénomène est très frappant pour certains types de sols. Il peut parfois être caractéristique du type de sol. Ainsi, les sols ferrugineux tropicaux lessivés présentent des différences de 2 à 3 unités en valeur et intensité entre l'état sec et l'état humide .

5.3. Matière organique et calcaire .

Sous cette rubrique est décrit tout ce qui a trait à l'influence de la matière organique sur les différents horizons, (aussi bien la litière que les horizons assombrés par la matière organique) ainsi qu'à celle du calcaire .

On signale tout d'abord si l'horizon est enrichi en matière organique ou non et on cherche à préciser grossièrement cet enrichissement. Les horizons sont classés suivant leurs teneurs en matière organique et on essaie de préciser le type d'humus.

Horizon organique : Un tel horizon contient plus de 20% de matière organique s'il est sableux, et plus de 30% s'il est argileux. La morphologie est dominée par les matériaux organiques qui se reconnaissent facilement par leur aspect fibreux .

Horizon moyennement organique : Les horizons contiennent de 6-8 à 20-30% de matière organique . Ils sont fortement assombris. Il est difficile de reconnaître la matière organique du complexe minéral .

Horizon faiblement organique : < 2 à 6% de matière organique. Au-dessous de cette teneur on ne qualifiera pas les horizons d'organiques.

On précise ensuite l'état de décomposition de la matière organique en reconnaissant l'état de dégradation des débris organiques; s'ils sont encore reconnaissables ou non . Un bon test consiste à sentir un échantillon. Une odeur butyrique signale une mauvaise décomposition en milieu anaérobie. Une odeur de champignon signale généralement une bonne décomposition en milieu aéré .

On indique enfin le degré d'association des matériaux organiques et minéraux. En effet, les éléments organiques et minéraux peuvent être grossièrement séparés ou au contraire intimement associés. Des revêtements organiques peuvent recouvrir les agrégats

N.B. Dans la recherche de ces caractéristiques, il faut se méfier de la couleur. Un assombrissement du profil n'est pas forcément lié à une augmentation des teneurs en matière organique. Certains sols ferreux, le manganèse noircissent les horizons. On se limite donc aux caractéristiques nettement définies et reconnaissables .

Teneurs en calcaire.

Le carbonate de calcium a une profonde influence sur la morphologie des profils. En particulier, il oriente l'évolution de la matière organique; il freine le lessivage de l'argile. Il est donc important de signaler la présence ou l'absence de ce matériau .

On a une idée de la teneur en CO_3Ca en projetant sur le profil à l'aide d'une pissette, de l'acide chlorhydrique au 1/2 et l'on observe s'il y a effervescence ou non . On se rappelle qu'un sable calcaire réagit plus vigoureusement qu'une marne aux teneurs en carbonate comparable .

On distingue les classes suivantes :

- . Non calcaire = aucune effervescence
- . Peu calcaire = très faible effervescence, juste visible, mais étant nettement perceptible à l'oreille .
- . Calcaire = effervescence visible.
- . Très calcaire = forte effervescence. Le calcaire se reconnaît généralement "de visu ".

Il est possible avec un peu d'entraînement et pour une région donnée, d'apprécier la charge en calcaire avec plus de détail. On indique ensuite la localisation du carbonate, son abondance et si besoin est, la forme et la taille des accumulations : en poudre, en pseudomycelium, en concrétions, en poupées, en nodules .

5.4. Texture .

La texture rend compte de la composition granulométrique de l'horizon considéré. Elle s'exprime par la teneur relative des différentes fractions granulométriques dont le diamètre moyen est inférieur à 2 mm. La présence de particules dont la taille est supérieure à 2 mm (graviers, cailloux, pierres) est signalée en ajoutant un adjectif aux noms des classes de texture .

La distinction entre les fractions granulométriques est plus ou moins arbitraire. Ces fractions sont définies dans différents systèmes :

- Le système international d'Atterberg comprenant :

argile		< 0,002 mm
limon	0,002 à	0,02 mm
sable fin	0,02 à	0,2 mm
sable grossier	0,2 à	2 mm

- Le système U.S.D.A. comprenant :

argile			0,002 mm
limon	0,002 à		0,05 mm
sable très fin	0,05 à		0,10 mm
sable fin	0,10 à		0,25 mm
sable moyen	0,25 à		0,5 mm
sable grossier	0,5 à		1,0 mm
sable très gros.	1,0 à		2,0 mm

En fait, pour les sols tropicaux, les divisions généralement utilisées sont les suivantes :

argile			0,002 mm
limon fin	0,002 à		0,02 mm
limon grossier	0,02 à		0,05 mm
sable fin	0,05 à		0,20 mm
sable grossier	0,20 à		2,0 mm

Les résultats précis des analyses granulométriques sont obtenus au laboratoire .

La détermination des classes

de textures se fait en nommant en premier la fraction granulométrique dominante et en second la fraction granulométrique qui lui succède en pourcentage .

Ainsi, le terme " sablo-argileuse " signale une texture à dominance sableuse et à teneur en argile appréciable .

• la définition des classes est déduite d'une représentation

triangulaire. Sur chaque côté d'un triangle équilatéral sont portées les teneurs en sable, limon et argile de 0 à 100 (cf. figures 19 et 20).

Le triangle des textures a été divisé en un certain nombre de secteurs qui correspondent à un certain nombre de zones de textures. Plusieurs triangles sont proposés, ce qui prouve qu'il n'est peut-être pas nécessaire de rechercher des définitions parfaites, les limites restant arbitraires .

Lorsque les teneurs en matière organique sont élevées (plus de 10%), on ajoute des termes adjectifs précisant cette donnée.

Exemple : argile humifère, sable limono-humifère .

Il est peut-être intéressant d'ajouter des termes plus spécifiques comme " tourbe ", " tourbeux ". De même , des teneurs élevées en carbonate de calcium (plus de 10%) amènent à l'emploi du mot : calcaire.

Exemple : sable calcaire; limon calcaire .

Éléments grossiers.

Les différents horizons des sols ne sont pas toujours composés uniquement de fractions granulométriques inférieures à 2 mm. Ils contiennent parfois des éléments plus grossiers en proportion appréciable. Pour indiquer ce fait, on ajoute au nom de la classe texturale un adjectif approprié. Cet adjectif est choisi en fonction du pourcentage et de la dimension moyenne de ces matériaux.

Dénomination employée pour les fragments grossiers du sol:

% éléments grossiers	dimensions dominantes ϕ 0,2-7,5 cm	ϕ 7,5-20 cm	$\phi > 20$ cm
2 - 15	peu graveleux	peu caillouteux	peu pierreux
15 - 50	graveleux	caillouteux	pierreux
50 - 90	très graveleux	très caillouteux	très pierreux
> 90	graviers	cailloux	pierres

Tableau 1 - Dénomination des éléments grossiers en fonction de leur taille et de leur pourcentage. On considère que le sol est utilisable jusqu'à un pourcentage d'éléments grossiers de 90%.

Nature des éléments grossiers.

Les éléments grossiers influencent la dynamique des sols non seulement par leur nombre et leur taille, mais également par leur composition et leur forme. Comme ces matériaux sont facilement observables, on peut faire des distinctions détaillées. Mais d'une façon générale, on ne retiendra que les données qui peuvent avoir une influence effective sur le sol, et principalement : sur l'infiltration et l'écoulement des eaux de percolation, sur le développement et la croissance des racines, sur la protection des particules fines qui peuvent être entraînées par érosion, etc... Concernant la nature des roches, on emploie des dénominations lithologiques (grès, calcaire, psammite, schiste, quartzite etc..) ou pédologiques (gravillons ferrugineux, nodules, calcaires, etc..)

La forme, et en relation avec celle-ci l'orientation de ces matériaux grossiers, doivent être signalés, les fragments pouvant être arrondis, anguleux (dangers de blessures sur les

racines), phylliteux. Dans ce dernier cas, si les fragments plats sont parallèles à la surface du sol, ils peuvent freiner l'écoulement de l'eau ou la pénétration des racines.

Il est donc possible de substituer à la combinaison pourcentage-dimension, la combinaison pourcentage-nature. Par exemple, une argile à silex est une argile accompagnée de 15 à 80% de silex .

5.5. - Structure.

La structure du sol exprime le mode d'assemblage des particules élémentaires du sol en particules composées. Il semble acquis que la structure n'est pas liée uniquement à la notion d'agrégats, mais d'une façon générale correspond à la manière dont les éléments constitutifs du sol sont arrangés les uns par rapport aux autres. Ces assemblages peuvent être constitués par des éléments simples ou particuliers, c'est-à-dire les éléments mêmes de la texture; des agrégats ou particules composées naturelles.

Ces assemblages naturels ne doivent pas être confondus avec : les mottes dues à des causes artificielles (labour par exemple); les fragments causés par la rupture de la motte; les concrétions, nodules, cuirasses, accidents divers, dans lesquels les éléments simples sont cimentés d'une façon irréversible.

Un agrégat (ped en anglais) est un solide géométrique naturel qui conserve une forme individuelle spécifique (déterminée lorsqu'on le manipule). Constitué par des éléments de terre fine et éventuellement par des éléments grossiers liés entre eux par des ciments colloïdaux ou des forces de cohésion variées qui peuvent être plus ou moins réversibles. Chaque agrégat est séparé des agrégats voisins par des surfaces de moindre résistance. Les surfaces extérieures de certains agrégats portent parfois des revêtements minces de couleurs différentes qui aident éventuellement à les séparer . D'autres surfaces ont la même couleur que celle de l'intérieur des agrégats.

La description de la structure fait appel à trois données : le type de structure qui concerne la forme et l'arrangement des agrégats; la classe de structure qui se réfère à la dimension des agrégats; le degré de développement de la structure

qui a trait à une évolution plus ou moins marquée de l'agrégation.

On évite ainsi les termes imagés, des néologismes^{pour} définir rapidement et synthétiquement des structures particulières et retenir une terminologie analytique simplifiée .

5.5.1.- Types de structures.

a. Structures naturelles . On distingue trois catégories de types de structures naturelles : les structures particulières, les structures massives ou continues, les structures fragmentaires.
Structures particulières.

Dans cette catégorie de structures, le sol est formé par les éléments du squelette textural non associés entre eux, c'est-à-dire n'ayant pas de cohésion. Les particules peuvent être :

-- simplement minérales. La classification correspond alors à celle de la texture. Une mention spécifique doit être faite pour les structures particulières à éléments très fins, difficilement discernables à l'oeil, constituées généralement de limons et d'argile que l'on désigne sous le nom de poudres. Ces poudres peuvent être plus ou moins fines et présenter des aspects variés. On reconnaît ainsi :

- une structure poudreuse caractéristique de certains sols halomorphes (en fait , il s'agit de microagrégats argileux).

- une structure cendreuse caractéristique de l'horizon A₂ des podzols, constituée par l'enchevêtrement de fins cristaux de quartz;

- une structure farineuse (fluffy en anglais) caractéristique de certains horizons des sols ocre-podzoliques .

-- ou organiques

Lorsqu'il s'agit d'éléments particuliers organiques, la classification repose sur la forme de ces éléments. On a : une structure fibreuse lorsqu'il y a enchevêtrement des racines, une structure feuilletée lorsqu'il y a orientation de fibres qui forment une série de couches superposées.

Structures massives ou continues.

Dans cette catégorie de structures, l'horizon forme un bloc unique qui se définit par l'impossibilité de séparer les éléments structuraux entre eux . Il est alors intéressant de connaître comment les blocs se brisent et quelle est la forme de leurs éclats .

Lorsque la pâte ne présente pas de constituants différenciés à l'oeil, on a une structure fondue. Lorsque la pâte contient des éléments reconnaissables, on distingue différents types de structure d'après la dimension moyenne des constituants et l'on a : des structures gréseuses : les éléments de type sableux sont liés par un ciment. Des structures poudingiformes et conglomératiques : les éléments de la taille " gravier " ou supérieure sont noyés dans un ciment fin .

Il est parfois difficile de distinguer la structure fondue de la structure finement particulaire lorsque la cohésion entre les éléments est très faible. Pratiquement, on essaie de rompre un fragment d'élément structural entre les doigts. S'il s'écrase en même temps qu'il se rompt, on classe la structure comme particulaire légèrement cohérente (ou fondue) A l'opposé, si l'élément structural massif se casse avec facilité, on le classe d'après sa plus ou moins grande fragilité .

Structures à éléments fragmentaires.

Cette catégorie de structures est la plus fréquente. Les éléments fragmentaires de la structure sont classés d'abord d'après leur forme, puis d'après l'orientation des solides géométriques reconnus .

On distingue trois séries de formes fondamentales : des formes anguleuses, des formes arrondies, des formes intermédiaires.

. Formes anguleuses :

Elles se caractérisent par la présence de faces planes et d'angles vifs. Généralement, les surfaces des polyèdres sont les empreintes de moules des surfaces des agrégats voisins + forme à angles droits :

- sans dimension préférentielle : structure cubique.
- à une dimension préférentielle (verticale) : structure prismatique.
- à deux dimensions préférentielles (dans le plan horizontal) : structure en plaque encore appelée structure lamellaire lorsque l'épaisseur est faible .

La structure en colonne ou columnaire est un cas particulier de la structure prismatique qui se caractérise par des prismes surmontés par des formes hémisphériques. .

La structure squameuse est un cas particulier de la structure lamellaire lorsque les lamelles se recourbent légèrement sous l'action de la dessiccation .

+ formes à angles aigus structure polyédrique (ex tétraédrique).

. Formes arrondies :

Ces formes sont sphériques ou ellipsoïdales. Elles définissent deux aspects de la structure grenue. Les surfaces ne s'accordent pas ou très peu aux surfaces des agrégats voisins. Ces agrégats sont relativement peu poreux .

. Formes intermédiaires :

Ce sont aussi des formes irrégulières constituées par l'assemblage de formes simples :

+ assemblage de formes arrondies structures grumeleuses. Les surfaces des agrégats ne s'accordent pas, mais les agrégats sont poreux .

+ assemblage de formes planes et arrondies structures polyédriques émoussées souvent appelées structures subangulaires ou nuciformes.

b. Structures artificielles .

A côté de ces formes structurales naturelles, existent des formes artificielles dues au travail de l'homme . Ces formes sont nombreuses. Elles peuvent cependant être ramenées à quelques types principaux dont la terminologie s'explique d'elle-même :

structure motteuse, structure en rouleaux, structure à éclats.

Enfin, il doit être fait mention des semelles de labour et des semelles d'irrigation qui constituent des niveaux difficilement pénétrables aux racines, sans parler de certains accidents pédologiques tels que les " pans " dont il sera traité plus loin .

c. Combinaison de plusieurs types de structures .

Il est fréquent d'observer des mélanges d'éléments structuraux. On les nomme en indiquant les deux types extrêmes, par exemple structure prismatique à cubique exprimant le mélange de ces deux formes; ou structure prismatique à tendance cubique signalant la présence de prismes peu développés en hauteur .

Il faut donc obligatoirement faire ressortir l'impression générale dégagée par l'horizon. Par exemple, pour une terre constituée par des pierres et d'un peu de matériaux fins, on aura une structure à éléments pierreux avec remplissage granulaire ou polyédrique, ou s'il n'y a qu'une certaine quantité de pierres et une proportion beaucoup plus importante d'éléments fragmentaires, on dira structure à éléments pierreux emballés dans une structure polyédrique ou structure polyédrique à éléments pierreux.

Des éléments limoneux ou sableux peuvent se trouver entraînés dans les cavités ou les fissures. On indique également la présence de ces accidents en parlant d'inclus ou de remplissage. Il arrive fréquemment, en particulier dans le cas de terres battantes que l'on observe des poches limoneuses englobées à l'intérieur des fragments. On indique la présence en précisant leur structure (souvent litée).

Il existe parfois dans certains horizons des éléments massifs discontinus, dont le caractère est d'être cimenté par des constituants relativement peu sensibles à l'eau (carbonates ou hydroxydes). Ce sont des concrétions qui remplissent le même rôle que les éléments grossiers et qui doivent être décrits comme tels (cf. paragraphe précédent).

d. Surstructure et sous-structure.

Les constituants de la structure ont parfois tendance à se regrouper pour redonner de nouveaux éléments structuraux ou, au contraire, à se diviser pour en donner de plus fins. On est alors amené à parler de surstructure ou de sous-structure .

La surstructure est en général l'ensemble des orientations, ou fissures, ou assemblages réguliers que l'on peut distinguer à l'oeil autour de l'élément structural principal. La sous-structure est une subdivision de l'élément structural principal. Par exemple, une structure prismatique peut avoir une sous-structure à éléments cubiques ou en plaques. Cette subdivision n'apparaît pas d'emblée mais peut s'obtenir à la main avec un léger effort . Inversement, des éléments structuraux nuciformes peuvent être englobés dans un système de fissures d'allure prismatique qui est une surstructure .

Les éléments de la surstructure pris comme base de la description sont ceux qui permettent de décrire l'état global de l'horizon. Les autres n'apparaissent que lors de l'examen ultérieur plus fin . De toutes façons, il est indispensable de suivre un ordre logique et constant en donnant d'abord une définition fondamentale de la structure avant de préciser les différentes sur ou sous-structures, les orientations, inclusions ou accidents divers .

e. Assemblage des éléments structuraux .

La disposition des éléments structuraux peut conférer un certain aspect au profil, qu'il importe de préciser lorsqu'il n'est plus inclus dans la définition fondamentale. Par exemple, on ne souligne pas les fissures verticales d'une structure prismatique, ou les fissures horizontales d'une structure en plaque. Par contre, on parle de litage dans le cas d'assemblages parallèles coupés par de petites discontinuités; de stratification; lorsqu'il y a superposition de couches de textures différentes .

On doit tenir compte également de l'existence d'accidents se manifestant sans donner lieu à des formes régulières. On observe des fentes, des canaux, des alvéoles suivant que les fissures s'élargissent, qu'il s'agisse de tubes ou de cavités fermées. Quand ces cavités sont petites et fréquentes, on obtient une structure assez typique appelée parfois structure en mie de pain . La forme et la fréquence de ces accidents seront notées .

5.5.2. Classes de structures .

Les classes de structures se réfèrent aux dimensions des unités structurales. Il s'agit naturellement de dimensions moyennes. Les dimensions des différentes classes varient souvent suivant le type de structure. Par exemple, les dimensions d'une structure polyédrique fine correspondent à celles d'une structure grumeleuse grossière . On distingue cinq classes par type de structure .

Tableau 2/.....

	très fine	fine	moyenne	grossière	très grossière
en plaque	1	1-2	2-5	5-10	10
prismatique	10	10-20	20-50	50-100	100
polyédrique	5	5-10	10-20	20-50	50
polyédrique émoussé	5	5-10	10-20	20-50	50
grumeleux	1	1-2	2-5	5-10	10
grenue	1	1-2	2-5		

Tableau 2 . Classes de structures établie en tenant compte des dimensions et des types de structure.

5.5.3. Degré de développement de la structure.

Le degré de développement de la structure exprime la différence entre la cohésion à l'intérieur des agrégats et l'adhésion des agrégats entre eux. Cette mesure varie avec l'humidité du sol. Elle devrait donc être faite aux humidités normales du sol étudié . D'une façon générale, c'est sur échantillons secs ou faiblement humides que la structure est la plus prononcée. Afin de préciser cette mesure, il convient donc d'indiquer grossièrement l'état d'humidité de l'horizon considéré. Sur le terrain, pour estimer le degré de développement de la structure, on ébranle l'échantillon étudié doucement entre les doigts de façon à isoler les agrégats les uns des autres. Une partie du matériau reste agrégé en polyèdres caractéristiques, une autre s'effrite en poussière et l'on compare les proportions relatives de ces deux fractions .

On distingue quatre degrés définis comme suit :

- pas d'unité structurale visible : il n'y a pas d'agrégation observable; la structure est massive à l'état cohérent, sinon elle est particulière .
- faiblement structuré : les unités structurales sont mal formées, difficilement perceptibles. L'échantillon se divise en peu d'agrégats entiers, mêlés à de nombreux agrégats brisés et beaucoup de matériaux meubles .

- Moyennement structuré : les unités structurales sont bien définies et distinctes sur l'échantillon mais assez difficilement perceptibles sur le profil . Les échantillons se décomposent en de nombreux agrégats entiers. Il y a peu d'unités structurales incomplètes et peu de matériaux meubles .
- Fortement structuré : les unités structurales sont extrêmement stables et distinctes. Elles sont plus ou moins cohérentes les unes aux autres . Elles s'observent parfaitement sur le profil en place. Les échantillons se débitent presque uniquement en agrégats entiers. Il n'y a pratiquement pas ou très peu d'unités brisées et de matériaux meubles .

5.6. - Porosité.

Dans la porosité, il faut distinguer la porosité vraie qui est une porosité diffuse et qui est plutôt une caractéristique d'ordre quantitatif à déterminer au laboratoire et la description des cavités qui est une caractéristique autant qualitative que quantitative .

Sur le terrain, il s'agit d'apprécier l'abondance de pores visibles à l'oeil nu soit sur une section de la masse de l'horizon dans le cas d'un horizon non structuré, soit sur une section des unités structurales. Il faut donc faire une distinction entre cette porosité à l'intérieur des agrégats et la porosité correspondant aux espaces qui séparent les unités structurales .

On pourrait donc parler de micro et de macroporosité en tenant compte pour celle-ci des fentes de retrait qui peuvent avoir une influence considérable sur le drainage du sol en début d'irrigation .

En ce qui concerne la porosité à l'intérieur des agrégats on peut employer les qualificatifs suivants, après observation à la loupe : compact, assez poreux, poreux, très poreux. Les cavités apparentes sont classées en : cavernes, fissures, alvéoles, tubes suivant leurs formes ou dimensions .

Les dimensions et les liaisons spécifiques sont précisées chaque fois que cela est possible. Par exemple, certains tubes peuvent être ferruginisés; des fissures peuvent être associés à des phénomènes de réduction, etc.

Il faut également vérifier s'il y a communication entre les différentes cavités, ce qui facilite la circulation des eaux. Certains horizons paraissent très poreux mais sont en fait peu perméables car les cavités sont entièrement isolées et ne communiquent pas les unes avec les autres. On parle parfois de structure vésiculaire.

En se rapportant uniquement à l'aspect actuel de la porosité globale, on distingue trois classes au niveau de chaque horizon :

- .très poreux : On observe nettement les interstices entre les particules. Lorsque le pied s'enfonce dans le sol celui-ci est souvent qualifié de creux ou de soulevé.
- .moyennement poreux: Les interstices entre les particules sont peu visibles. Les racines s'installent mais sont peu garnies de poils. Le pied s'enfonce difficilement dans le sol, qui est parfois dit rassis.
- .peu poreux ou compact : On ne distingue aucun interstice entre les particules. Les racines ne pénètrent pas ou mal. Le pied ne s'enfonce pas dans le sol qui est tassé.

L'étude de la porosité peut être complétée en précisant la perméabilité des différents horizons. En fait, la perméabilité du profil est déterminée par celle de l'horizon le moins perméable .

5.7 . Consistance .

La consistance est le comportement mécanique du sol à l'égard d'une force . Sur le terrain, on se limite à ce qui peut être apprécié au doigt et à l'oeil. La consistance comprend les caractéristiques exprimées par le type et le degré de cohésion, d'adhésion ou par la résistance à la déformation ou à la rupture.

La consistance est sous la dépendance étroite de l'humidité. Elle est définie par les limites d'Atterberg. En pratique, sur le terrain les tests appliqués varient suivant les degrés d'humidité .

-sec: A l'air l'humidité est inférieure au point de flétrissement. Les caractéristiques de l'horizon sont sa fragilité ou sa résistance à l'éclatement .

- humide: L'humidité se situe entre le point de flétrissement et la capacité du champ. L'horizon est à l'état plastique, c'est à-dire qu'il peut subir une déformation sans rupture .

- trempé: L'humidité est supérieure à la capacité au champ. Le sol est à l'état pâteux ou pseudo-fluide. Il peut s'écouler sous son propre poids .

D'une façon générale, la détermination de la consistance s'effectue soit au niveau de l'horizon, soit au niveau des agrégats lorsque cela est possible .

5.7.1. Consistance à l'état sec .

A ce degré d'humidité, l'échantillon se caractérise par sa rigidité, sa fragilité. Il présente une résistance maximum à la pression; une tendance plus ou moins grande à être écrasé en poudre ou en fragments à arêtes aiguës. Par pression, le matériau écrasé ne peut devenir à nouveau cohérent.

Pour estimer les différents degrés de cet état, on cherche à briser une certaine quantité de matériau sec entre les mains et à écraser les fragments entre les doigts .

On distingue les classes suivantes :

- . meuble : non cohérent
- . peu cohérent : le matériau est fragile. Il tombe en poudre ou en grains individuels sous faible pression .
- . moyennement cohérent : l'échantillon est peu résistant à la pression, mais la résistance est sensible. Il peut facilement être brisé entre le pouce et l'index .
- . dur : l'échantillon résiste à la pression. Il peut sans difficulté être brisé entre les mains, mais résiste à l'écrasement entre le pouce et l'index .

5.7.2. Consistance à l'état humide .

A ce degré d'humidité, le sol montre une forme de consistance qui se caractérise par une tendance à se briser en fragments plus petits, une tendance à se déformer avant rupture, une absence de fragilité, une possibilité à devenir à nouveau cohérent par pression des fragments .

Comme la résistance à l'écrasement diminue avec le degré d'humidité, la valeur des tests est limitée par l'appréciation de cette humidité .

Pour estimer ces valeurs, on écrase et on serre dans la paume de la main et entre les doigts, une certaine quantité de terre légèrement humide. On reconnaît les classes suivantes :

- . très friable : Le matériau s'écrase facilement sous faible pression. Il n'offre pas de résistance sensible. Il redevient cohérent après une nouvelle pression .
- . friable . Le matériau s'écrase sous une légère pression nettement perceptible. Il redevient cohérent après une nouvelle pression .
- . ferme . Le matériau s'écrase sous une pression modérée. La résistance à l'écrasement est très sensible. Il ne devient plus cohérent après une nouvelle pression .
- . très ferme . Le matériau ne s'écrase que sous une forte pression et très difficilement entre le pouce et l'index .
- . extrêmement ferme . Le matériau résiste pratiquement à toute pression. Il faut le briser morceau par morceau .

5.7.3. Consistance à l'état trempé.

A cet état, on observe souvent des films d'eau à la surface des agrégats. Il peut être aussi possible de faire suinter de l'eau en serrant fortement l'échantillon dans le creux de la main . Pour les plus fortes humidités, on apprécie l'adhésivité sinon on détermine le degré de plasticité.

5.7.3.1. Adhésivité.

Le test s'appuie sur la propriété du sol à adhérer à d'autres objets. Pour son évaluation sur le terrain, le matériau est pressé entre le pouce et l'index, puis en écartant les doigts on note le type d'adhérence . On détermine les classes suivantes :

- . non collant Après pression, pratiquement aucun matériau n'adhère au pouce et à l'index.
- . peu collant Après pression, le matériau adhère au pouce et à l'index, mais se détache de l'un d'eux lorsque l'on écarte les doigts, sans qu'il soit étiré d'une façon notable .

- . collant Après pression, le matériau adhère au pouce et à l'index. Il a tendance à s'étirer un peu, puis à se rompre plutôt qu'à se détacher d'un des doigts lorsque l'on écarte ces derniers .
- . très collant Après pression, le matériau adhère au pouce et à l'index, et s'étire fortement lorsqu'on écarte les doigts .

5.7.3.2. Plasticité.

La plasticité est la propriété d'un matériau qui consiste pour ce dernier à changer continuellement de forme sous l'influence d'une pression et de conserver cette forme après suppression de la pression. Pour déterminer la plasticité sur le terrain, on roule le matériau entre les doigts et l'on essaie de faire un pâton cylindrique de plus en plus fin.

On détermine les classes suivantes :

- . non plastique . On ne peut pas former de rouleau.
- . peu plastique . On peut former un rouleau et il est nécessaire d'appliquer une pression modérée pour déformer la masse .
- très plastique . On peut former un rouleau et il faut appliquer une forte pression pour déformer la masse .

5.8. Cohésion . La cohésion peut être appréciée au niveau de l'horizon ou au niveau des agrégats. Il faut distinguer entre la cohésion réversible et la cohésion irréversible. Dans le premier cas, la cohésion disparaît en tout ou en partie sous l'action de l'humidité, dans le second cas, le matériau reste cohérent même en milieu très humide . Il s'agit alors d'une cimentation .

5.8.1. Cohésion réversible .

Au niveau de l'horizon, cette propriété n'a pas de sens physique précis . Elle ne se définit que par un effort physique correspondant à une utilisation particulière qui varie suivant la nature de l'outil employé.

Le terme " meuble " se définit par l'absence de cohésion entre les éléments de petite taille. A sec, il y a formation d'un talus d'éboulement. Le terme " meuble " s'oppose à "cohérent ". On peut distinguer la cohésion vraie qui résulte de l'action de liaisons internes homogènes (pour sa détermination on est ramené aux tests de la consistance des sols à l'état sec); et la pseudo-cohésion dont les effets similaires sont dûs à des causes externes variées, non homogènes, par exemple : enchevêtrements d'éléments, frottement dû au poids d'éléments (instruments aratoires, glacier, etc.) comme c'est le cas pour les semelles de labour et peut-être pour certaines formations particulières des sols comme les "fragipans".

5.8.2. Cimentation .

La cimentation se réfère à une consistance dure et fragile, causée par un liant autre que les minéraux argileux (carbonates, silice, sesquioxides, etc.) Elle implique que l'induration ne change pas ou peu avec l'humectation. La cimentation peut être homogène ou discontinue à l'intérieur d'un horizon. Suivant le cas, elle sera appréciée au niveau de l'horizon ou au niveau des éléments cimentés . On distingue les catégories suivantes :

- . Peu cimenté La masse est fragile et dure mais peut être brisée entre les mains .
- . Cimenté La masse se brise difficilement entre les mains. Elle se façonne facilement à l'aide d'un instrument tranchant (bêche, couteau).
- . Fortement cimenté La masse ne peut plus être brisée entre les mains. Elle se façonne difficilement à l'aide d'un instrument tranchant. Elle se brise sous le choc du marteau .
- . Très cimenté La masse se brise difficilement au marteau qui rebondit en choc. Le matériau résonne sous l'influence du coup .

5.9. Enracinement.

Bien que souvent oubliée lors de la description des profils, l'étude du système racinaire est extrêmement importante pour la définition des conditions du milieu. Il existe en effet des relations étroites entre les faits pédologiques et le mode de

développement du système racinaire . Il importe donc de signaler :

- La nature des racines en distinguant : les grosses racines lignifiées, vivantes et mortes, les racines herbacées, le chevelu des racines absorbantes.

- Les espèces auxquelles appartiennent les racines, lorsque cela est possible .

- La taille des racines : grosses (plus de 10 mm de diamètre), moyennes (2 à 10 mm), chevelues_{et} (moins de 2 mm).

- La répartition des racines entre/dans les horizons et l'abondance .

- La direction de pénétration des racines et la façon dont elles prospectent le sol .

Il faut indiquer si les racines suivent des fentes ou des lignes de moindre résistance; si les poils absorbants pénètrent ou ne pénètrent pas à l'intérieur des agrégats. Il arrive fréquemment que des racines buttent sur un horizon plus cohérent, et s'étalent horizontalement au sommet de ce dernier (par exemple, une semelle de labour, un niveau d'engorgement, etc)

- L'état sanitaire des racines. Ce fait se caractérise le plus souvent par des pourritures dégageant des odeurs butyriques, ou par des blessures sur les racines provenant de l'action d'animaux, ou du contact avec certains matériaux durs et coupants (quartz par exemple).

- On précise enfin les liaisons qui peuvent exister entre la présence des racines et certaines formations (traînées rouilles dans les horizons de surface, langue de marmorisation, concrétions, gley, etc.).

5.10. Formations particulières .

Ces formations dont la liste ci-jointe n'est pas exhaustive, sont parfois importantes car elles correspondent à des processus pédogénétiques particuliers qui permettent d'interpréter les profils .

Revêtement argileux (Coatings en anglais)

Il s'agit de minces pellicules d'argiles qui se déposent dans certains horizons sur les unités structurales ou le long des fentes de retrait. Ces revêtements sont plus ou moins épais et plus ou moins continus. Il ne faut pas les confondre avec les faces luisantes .

On indique leur emplacement, leur épaisseur, la présence éventuelle d'une stratification, leur couleur, leurs formes.

Les faces de glissement ou " slickensides " Ce sont des faces polies et striées qui s'observent sur certains agrégats et dont l'origine est liée au frottement de deux masses l'une sur l'autre à la suite du gonflement différentiel d'argiles .

Tubes ferruginisés signalant d'anciennes racines.

Des morceaux de charbon de bois, de poteries, de débris divers confirmant des contaminations et des remaniements.

Des formations dues à la faune du sol : galeries d'insectes ou d'animaux fouisseurs, par exemple : des " Krotovina ", déjections de vers de terre, etc.

Efflorescences salines diverses : degré de cristallisation, couleur, goût, etc....

C h a p i t r e 6

L'Etude du sol au Laboratoire

A. Caractéristiques physiques, chimiques et minéralogiques.

6.1. Caractéristiques physiques du sol .

Texture et analyse mécanique.

Structure : porosité et stabilité structurale.

L'eau et le sol : état de l'eau dans le sol.

déplacement .

Le profil hydrique.

Besoin en eau des cultures .

6.2. Caractéristiques chimiques .

La capacité d'échange .

Les cations échangeables .

La réaction du sol .

le pH; acidité d'échange

Potentiel de Redox .

6.3. Caractérisation des constituants minéraux

Méthodes chimiques.

Méthodes thermiques.

Emploi de rayonnements.

Emploi des électrons.

Interprétation .

Lorsqu'on achève la description détaillée des différents horizons constituant le profil du sol, un certain nombre d'échantillons peuvent être prélevés et amenés au laboratoire en vue de déterminations qui viendront compléter ou préciser les données de terrain.

Les mesures qu'on peut effectuer au laboratoire sont extrêmement nombreuses . On ne peut les réaliser toutes pour chaque échantillon. Le choix résulte du problème posé au pédologue. On passe en revue dans ce chapitre les principales caractéristiques qui font l'objet de mesures dans le sol en insistant davantage sur les principes que sur les techniques pour lesquelles ne sont fournies que des indications sommaires .

Elles sont classées en trois rubriques :

- 1) Les mesures physiques qui concernent la granulométrie, la structure et les relations entre l'eau et le sol;
- 2) Les caractéristiques chimiques ou électroioniques telles que la capacité d'échange et les bases échangeables; la réaction et le potentiel de redox;
- 3) la caractérisation des constituants minéraux qui a pris un grand développement par la mise en oeuvre de techniques physiques;

Les caractéristiques biologiques qui mettent en oeuvre des méthodes très spéciales font l'objet d'un chapitre particulier.

6.1. Caractéristiques Physiques du sol .

Les propriétés physiques des sols sont la résultante

- a) de la nature et de la proportion des divers constituants, en d'autres termes de la texture ;
- b) de l'agencement spatial de ces divers constituants , donc de la structure ;
- c) de la quantité et de l'état de l'eau occupant en partie ou en totalité les vides existant entre les unités structurales du sol .

6.1.1. Texture des sols .

Les caractéristiques essentielles d'un sol sont fonction des proportions relatives de ses divers constituants. On distingue 2 grandes catégories de constituants : minéraux et organiques.

Les constituants minéraux peuvent être subdivisés en fonction du diamètre des particules élémentaires. Un petit nombre de classes de dimensions ont été définies dans ce but . Elles ont été présentées à propos de l'étude du sol en place.

L'analyse granulométrique (ou analyse mécanique) a pour but de déterminer les proportions des divers constituants élémentaires du sol . Ces constituants élémentaires sont normalement associés les uns aux autres, dans le sol en place, pour former des agrégats, plus ou moins cohérents et poreux. Les proportions relatives, dans un même échantillon, des particules des différentes classes granulométriques du sol définissent la texture du sol.

Selon les pays et les auteurs, le nombre des classes texturales varie en fonction des éléments retenus. Lorsque l'on ne tient compte que de 2 types d'éléments (par exemple argile-limon, argile-sable ou limon-sable), on obtient 9 classes texturales, comme dans l'ancienne classification française des textures. Si, au contraire, 3 éléments sont pris en compte, séparément ou simultanément, le nombre des classes texturales augmente: 13 dans la classification de l'USDA, 17 dans la nouvelle classification française (voir diagramme des textures).

L'analyse granulométrique d'un sol est réalisée de la façon suivante: opérant sur une quantité de terre fine connue, de l'ordre de 10 grammes, on élimine dans un premier temps les éléments qui cimentent entre elles les particules élémentaires: matière organique, ions calcium. Pour ce faire, l'échantillon de terre est traité successivement avec de l'eau oxygénée (qui décompose la matière organique) et avec de l'hexamétaphosphate de sodium (qui masque l'effet des ions calcium). La terre est alors agitée pour réaliser une suspension homogène. Lorsque cette suspension est laissée au repos, les particules élémentaires se déposent dans le fond du récipient. Leur vitesse de chute obéit à la loi de Stokes, c'est-à-dire qu'elle est constante, et proportionnelle au carré du rayon de la particule . En effectuant des prélèvements de suspension à des temps connus, correspondant aux vitesses de chute des particules de moins de 2 μ et de moins de 20 μ , on obtiendra des échantillons de suspension ne contenant que l'argile ou l'ensemble argile + limon. Les 3 fractions sableuses seront déterminées par tamisage. Les résultats sont rapportés à un poids de terre sèche de 100 g.

On utilise couramment, pour synthétiser les résultats de l'analyse granulométrique, des représentations graphiques en coordonnées triangulaires permettant de qualifier la texture du sol . Un exemple d'un tel diagramme est le triangle des textures mis au point au Laboratoire des Sols de l'I.N.R.A. Versailles (Figure).

Les textures très fines correspondent aux sols à teneurs élevées en argile, plastiques, à fort pouvoir de rétention d'eau. Les textures grossières sont celles des sols riches en sables, légers, sans cohésion .

La notion de texture d'un sol présente une importance pratique considérable: elle détermine dans une large mesure les caractéristiques principales de ce sol dans les domaines de la rétention d'eau, de la capacité d'échange d'ions et de la structure .

6.1.2. - Structure des sols .

Les particules élémentaires constituant le sol ne sont pas normalement individualisées, mais associées en agrégats. La structure du sol est définie par l'agencement des éléments les uns par rapport aux autres. Elle englobe la forme et la dimension des mottes, ou éléments structuraux, et leur disposition relative dans un horizon déterminé. La sous-structure correspond à la forme et à la dimension des unités structurales dont la juxtaposition forme des éléments structuraux plus volumineux, dits primaires .

Les éléments structuraux peuvent être classés par taille, mais aussi en fonction de leur forme. Selon ce dernier critère, trois classes de structures peuvent être distinguées :

a) Structure particulaire - Le sol est alors constitué par des éléments du squelette, non agrégés. Exemple : structures cendreuse, fibreuse, feuilletée.

b) Structure massive ou continue - Le sol forme alors un bloc unique. Sous-classes : types ciment, grès, poudingue.

c) Structures fragmentaires - Les constituants élémentaires sont associés en agrégats ou en mottes .

Ces trois types de structures et leurs subdivisions ont déjà été détaillés dans le chapitre précédent .

La structure du sol est une notion essentiellement descriptive et qualitative, mais elle conditionne directement la porosité et l'état d'ameublissement. La porosité totale du sol est la proportion du volume total du sol occupé par l'eau après ressuyage, et la macroporosité ou capacité minimum pour l'air .

La cohésion du sol est définie comme sa résistance à la rupture. L'ameublissement correspond au contraire à la mobilité des éléments les uns par rapport aux autres, et peut être estimé à partir de la résistance du sol à la pénétration d'une pointe métallique .

La structure du sol n'est pas une caractéristique définitive du sol, car elle est soumise à l'action d'un certain nombre d'agents de dégradation, dont le plus important est l'eau. D'où la notion dynamique de stabilité structurale qui peut être définie comme l'aptitude des terres à résister à l'action de l'eau. Cette stabilité structurale est fonction directe de la cohésion des agrégats, de la non mouillabilité du sol, et de la dispersabilité des colloïdes. Ces trois facteurs sont eux-mêmes sous la dépendance de la nature et de la proportion de l'argile, de la quantité et du type de matière organique, et de la nature des ions du complexe absorbant. La stabilité structurale peut être estimée à partir de l'indice de stabilité défini par S. HENIN. Cet indice est établi à partir des résultats de 3 tests de résistance des agrégats (de 0,2 à 2 mm de diamètre) à l'action de l'eau : sans prétraitement, après prétraitement à l'alcool, après prétraitement au benzène, et d'un test de mesure de la dispersion . L'indice d'instabilité obtenu, rapport de la dispersion sur la moyenne des 3 fractions agrégées, est d'autant plus faible que la structure du sol résiste mieux à l'action de l'eau .

Toute amélioration de l'état structural d'un sol, grâce aux façons culturales, suppose le maintien ou l'obtention préalable d'une bonne stabilité de la structure. Pour protéger ou améliorer la stabilité structurale, on peut protéger la surface du sol pour réduire l'effet d'impact des gouttes d'eau; on peut également limiter la stagnation de l'eau en surface, ou tenter d'agir sur la texture du sol (marnage, labour profond, sablage). Les techniques les plus répandues d'amélioration de la stabilité sont celles :

- a) - qui tendent à modifier l'état ionique du sol : remplacement des ions sodium du complexe par des ions calcium par plâtre dans le cas des sols à alcali, par exemple;
- b) - qui visent à améliorer la teneur en matière organique du sol : fumure organique, engrais verts résidus de récolte, maintien du sol sous jachère .

L'amélioration de la structure elle-même du sol peut être le fait, soit de certains agents naturels (alternances de dessiccation et d'humectation, action du gel, rôle de la faune du sol

et des racines) soit des techniques culturales (drainage, labours, façons superficielles).

En conclusion, la structure du sol commande de très nombreuses propriétés physiques ayant des incidences sur le développement des plantes cultivées. Mais chacune de ces propriétés, considérée séparément, est insuffisante pour expliquer l'état du sol, le rôle des facteurs dominants et leurs interactions .

6.1.3. Relations Sol-Eau.

6.1.3.1. - Etat de l'eau dans le sol .

Le sol a la propriété de retenir l'eau dans les interstices des particules solides, où il existe des formes de rétention qui permettent à l'eau d'échapper partiellement à l'action de la pesanteur, mais qui la rendent, dans une certaine mesure, inutilisable par les végétaux. L'eau s'étale sur les particules solides sous forme de films d'autant plus épais que le sol est plus humide . Au contact de 2 particules, le raccord des films conduit à la formation de ménisques, délimitant des manchettes. L'eau des films est soumise à une pression due aux forces d'adhésion, d'autant plus élevée que le film est plus mince, et les ménisques plus incurvés . Cette pression est souvent appelée "pression capillaire", ou encore "tension d'humidité" .

En sol saturé d'eau, il n'y a ni film, ni ménisque, et la pression capillaire est nulle. En sol humide mais ressuyé, l'air a pénétré dans le sol, et la pression peut varier de 100 à 1000 g/cm². En sol desséché à l'air libre, la pression capillaire peut atteindre 1000 atmosphères. On étudie en général, non pas la pression capillaire elle-même, mais son logarithme décimal, correspondant à la notation pF qui exprime le degré réel de sécheresse du sol: en effet, une même quantité d'eau dans un sol argileux et dans un sol sableux sera disponible de façon très différente dans les 2 cas. Chaque échantillon de sol est caractérisé par une courbe caractéristique des pressions capillaires en fonction du taux d'humidité: c'est la courbe humidité / pF .

Les valeurs les plus usitées du pF sont les suivantes :

Pression capillaire g/cm ²	pF	Taux d'humidité
0	-	Sol saturé
100	2,0	Capacité au champ des sols sableux
500	2,7	Capacité au champ des terres franches
1000	3,0	-
16000	4,2	Point de flétrissement

Tableau 3 - Relations entre le pF et le taux d'humidité du sol.

Rappelons que le taux d'humidité du sol est exprimé en % d'eau par rapport au poids de la terre sèche. Le pF diminue lorsque le taux d'humidité augmente. En règle générale, les courbes humidité_pF se décalent vers les humidités élevées au fur et à mesure qu'augmente le taux d'éléments fins .

Le taux d'humidité du sol subit en général une variation saisonnière au cours de l'année. En période de pluie (mais après ressuyage), il est à la capacité au champ, valeur maximum de la rétention puisque tout apport supplémentaire est éliminé par drainage naturel. La capacité au champ ne correspond pas à une valeur définie, mais à une gamme qui s'étend, selon les sols, de pF 1,9 à pF 3,0. En période de sécheresse, le taux d'humidité s'abaisse pour atteindre parfois des valeurs incompatibles avec l'alimentation hydrique de la plante : c'est le point de flétrissement permanent; qui correspond, quel que soit le sol, à pF 4,2.

L'intervalle compris entre capacité au champ et point de flétrissement correspond à la gamme d'eau utilisable par un végétal .

6.1.3.2. - Déplacements de l'eau dans le sol.

Il existe plusieurs modes de déplacement de l'eau dans le sol :

a) L'eau peut diffuser à l'état de vapeur. Elle circule alors des points les plus chauds vers les points les plus froids (donc de la profondeur vers la surface la nuit et inversement le jour) et des points humides vers les points secs, mais ceci seulement lorsque le taux d'humidité est inférieur au point de

flétrissement. Ce processus peut être important, mais il est limité aux quelques centimètres superficiels du sol .

b) Diffusion capillaire. L'eau circule alors, à l'état liquide, d'un point humide vers un point plus sec, ce qui correspond à une tendance des films d'eau à s'étaler selon une épaisseur uniforme . On peut ainsi expliquer certains phénomènes d'ascension de l'eau dans un sol sec .

Mais il existe de nombreux cas d'exception à la loi de la diffusion capillaire. Par exemple, l'expérience montre que l'imbibition par le bas d'une colonne de sol sec à partir d'une nappe libre n'intéresse qu'une hauteur limitée de terre . Même l'existence d'un fort gradient d'humidité au contact sol sec - sol humide est insuffisante pour assurer la diffusion de l'eau dans ce cas. Un phénomène analogue peut se manifester lors de l'arrosage de la surface d'un sol sec ;

Par contre, tout le réseau liquide est susceptible de se mouvoir en bloc vers le haut lorsque les horizons superficiels sont soumis à une évaporation ou à la succion des racines : il s'agit d'un processus particulier de la diffusion capillaire, qui a reçu le nom de "déplacement de l'eau sous forme de films". Ce déplacement est indépendant du sens et de la valeur du gradient d'humidité. Il fait intervenir la cohésion de l'eau, dont le déplacement correspond au mouvement d'ensemble des films. Les couches de sol affectées par le phénomène d'évaporation seront donc d'autant plus épaisses que les films seront plus longs .

6.1.3.3. Evolution saisonnière des profils hydriques .

On peut caractériser l'état hydrique d'un sol à un moment donné en déterminant l'humidité d'échantillons prélevés dans des tranches successives de sol jusqu'à une certaine profondeur. La représentation graphique des chiffres obtenus en fonction de cette profondeur constitue le profil hydrique. Pour juger si l'humidité du profil est satisfaisante ou non, il convient de faire figurer sur le même graphique les valeurs de la capacité au champ et du point de flétrissement. La comparaison des 3 courbes obtenues permettra d'apprécier :

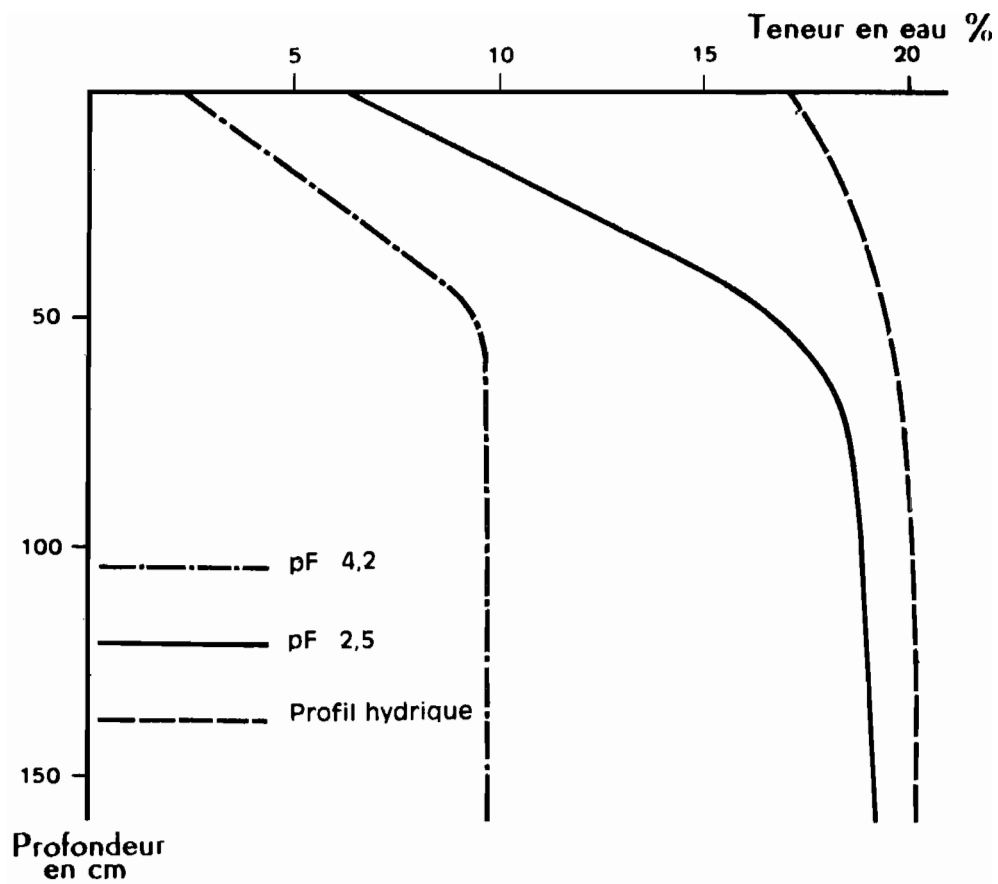


Fig. 10 - Relation entre la teneur en eau du sol à différents pF et la profondeur.

- 1°. La quantité d'eau totale présente dans le sol sur l'épaisseur considérée;
- 2°. La quantité d'eau disponible pour le végétal;
- 3°. La quantité d'eau nécessaire pour ramener au sol l'humidité correspondant à la capacité au champ .

En période pluvieuse et sous réserve que les mesures soient effectuées 24 ou 48 heures après la dernière pluie, le sol se trouve au voisinage de la capacité au champ et les réserves sont reconstituées.

Au cours de la période sèche qui suivra, les pertes par évaporation sont telles que le sol se dessèche, la vitesse de dessèchement allant en s'atténuant vers la profondeur. De plus, le dessèchement sera moins brutal en sol couvert qu'en sol nu.

On désigne sous le nom de déficit en eau du sol la hauteur d'eau, exprimée en mm, nécessaire pour reconstituer les réserves du sol et ramener le taux d'humidité à la capacité de rétention, sur toute la hauteur du profil.

Lorsque la saison pluvieuse réapparaît, le déficit en eau du sol se comble peu à peu, et le profil hydrique se stabilise finalement au voisinage de la capacité de rétention .

6.I.3.4. Besoins en eau des cultures.

L'eau de constitution des végétaux frais ne constitue qu'une très faible partie des quantités nécessaires aux plantes . La fraction la plus élevée ne fait que traverser le végétal pour être éliminée au niveau des feuilles par la transpiration . D'où l'intérêt de la mesure de la quantité d'eau transpirée par le végétal lorsque l'eau ne fait pas défaut. Cette quantité d'eau, additionnée de l'eau perdue au niveau du sol par évaporation, constitue l'évapotranspiration potentielle. Elle est à peu près indépendante du type de végétation, et liée étroitement aux données météorologiques (température, humidité de l'air, vent, radiation globale...).

Lorsque l'alimentation de la plante en eau n'est plus assurée dans des conditions optima (sécheresse du sol, mulch naturel, épuisement des réserves), l'évapotranspiration réelle est inférieure à l'évapotranspiration potentielle .

La connaissance de l'évapotranspiration potentielle et des précipitations conduit à calculer par différence, le déficit théorique d'eau du sol, compte tenu du fait que les réserves sont regarnies en fin de saison humide

Si le déficit réel varie comme le déficit théorique, c'est que l'évapotranspiration réelle est équivalente à l'évapotranspiration potentielle. S'il augmente moins vite, il y aura soit économie de l'eau qui peut être bénéfique au végétal, soit sécheresse (couvert végétal clairsemé, flétrissement).

En conclusion, les besoins en eau du végétal sont essentiellement fonction du climat, mais ils dépendent également de la période pendant laquelle le végétal couvre le sol et est en plein développement. La quantité d'eau disponible varie selon les caractères du sol (texture et structure) mais aussi selon l'extension de l'enracinement .

6.2. Caractéristiques chimiques .

6.2.1. La capacité d'échange.

Le sol présente la propriété d'échanger de manière réversible soit des cations, soit des anions. L'échange des cations est certainement la plus importante.

La capacité d'échange de cations d'un sol (.en abrégé C.E.C.; dans les publications de langue anglaise Base exchange capacity ou B.E.C.) est la somme de cations qu'il est capable de fixer. On la désigne couramment par la lettre T. La somme de cations autres que l'aluminium et l'hydrogène, effectivement fixés est désignée par S. Le degré de saturation V est le rapport $\frac{S}{T} \times 100$. S. et T sont exprimés en méq/100 g de sol .

L'acidité d'échange est celle qui résulte de l'action d'un sel neutre non tamponné sur un sol. Elle sera étudiée avec l'acidité du sol (paragraphe 6.2.3.)

6.2.1.1. Causes de la capacité d'échange. Celle-ci est due à la fois à la fraction minérale et à la fraction organique .

. Causes de la capacité d'échange dans la fraction minérale. Elle est située au niveau des minéraux argileux. Certains minéraux présentent des substitutions dans différentes parties du feuillet. Dans la couche octaédrique, du magnésium peut se substituer à

l'aluminium (cas des montmorillonites); dans la couche tétraédrique , il peut y avoir substitution de silicium par de l'aluminium. (cas de l'illite, des vermiculites, etc). En raison des différences de valence, il en résulte un déficit de charge important qui doit être compensé à l'intérieur ou à l'extérieur du réseau par des cations .

Une autre cause de capacité d'échange est due aux ruptures sur les bords des feuillets. C'est la cause de la capacité d'échange faible de la kaolinite pour laquelle il n'y a pas de substitution dans le réseau .

Une troisième cause est due à la dissociation des hydroxydes liés à l'aluminium. C'est le cas pour l'halloysite qui est une kaolinite hydratée.

. Causes de la capacité d'échange de la fraction organique du sol . Elle est due essentiellement à la présence de groupements tels que acide (COOH)phénol (-OH) dont le nombre et la position sont très variables. Elle est de toute façon beaucoup plus élevée que pour la fraction minérale du sol.

On a essayé d'établir des équations permettant de calculer la capacité d'échange en fonction des teneurs en argile et en matière organique. Elles ne peuvent avoir qu'une valeur très limitée sans portée générale .

Facteurs influant sur la capacité d'échange.

6.2.1.2 Un certain nombre de facteurs ont une influence marquée sur la capacité d'échange. Ce sont : la nature des constituants et leur taille; le pH; la nature des cations et des anions.

a. Les constituants. La capacité d'échange est une propriété de la surface des particules . Elle est donc d'autant plus forte que la taille diminue. Les sables et les limons n'ont donc qu'une capacité d'échange très réduite, sauf dans certains cas où ces fractions renferment des produits en cours d'altération, ou bien des minéraux zéolithiques dont la capacité d'échange est élevée : .

Dans la fraction inférieure à 2 μ , la capacité d'échange varie beaucoup suivant la nature des minéraux argileux. Les valeurs sont les suivantes :

	mé/100 g
Kaolinite	5-15
Halloysite	30
Illite	30
Montmorillonites	80-130
Vermiculites	100-150

Une mention spéciale doit être faite pour les produits amorphes contenant de la silice, de l'alumine, du fer et beaucoup d'eau, connus sous le nom d'allophanes. Ils ont une capacité d'échange très élevée et variable suivant qu'on la détermine en milieu acide ou alcalin .

b. Le pH auquel on mesure la capacité d'échange a une importance très nette. Au-dessous de pH 6, la capacité d'échange a une valeur généralement stable. On l'attribue à ce qu'on appelle la charge permanente qui est due aux substitutions dans les réseaux (montmorillonite, vermiculite). Au-dessus de pH 6, la capacité d'échange augmente avec le pH. C'est la charge variable. Elle est attribuée aux effets de bordure et à la dissociation des hydroxydes (kaolinite).

Les variations du pH sont beaucoup plus marquées sur la matière organique que sur la matière minérale à partir de pH 6.

Il est donc difficile de comparer des capacités d'échange mesurées à des pH différents. Il y a donc lieu de constater que la mesure, qui a forcément un caractère conventionnel, doit être effectuée avec une même technique, pour que les valeurs soient comparables .

c. La nature du cation que l'on fait intervenir dans la mesure de la capacité a une influence sur celle-ci. En principe, un cation monovalent neutralise une charge; l'expérience prouve qu'un cation divalent ne suffit pas pour neutraliser deux charges, sans doute en raison de l'éloignement de celles-ci. L'intervention de potassium dans la mesure, peut provoquer, s'il y a de l'illite, la fermeture des feuillets et le blocage de certaines positions d'échange. La présence d'hydroxydes amorphes provoque également un blocage de certaines positions et une diminution de la capacité d'échange . Par conséquent, la nature de l'ion employé n'est pas indifférente .

6.2.1.3. Principe des mesures de capacité d'échange.

Le sol est lessivé avec un sel d'un cation déterminé qui va déplacer les cations échangeables et prendre leur place. On traite par un nouveau sel et on dose la quantité du premier trouvé en solution. D'une manière générale, on opère à un pH neutre ou légèrement alcalin et on traite le sol par des ions NH_4^+ , Ca^{2+} ou Ba^{2+} . Le choix est dicté le plus souvent par des commodités analytiques.

6.2.2. Les cations échangeables.

Les cations échangeables sont fixés de manière réversible sur les particules de sol. Ils sont susceptibles d'être déplacés par d'autres cations et peuvent reprendre la place qu'ils ont perdue. Diverses caractéristiques des cations échangeables sont intéressantes à connaître :

- La nature des ions échangeables (avec quelques ions particuliers tels que Na^+ , H^+ , Al^{3+}).
- L'échangeabilité des cations.
- La répartition des cations à la surface des particules .
- Les lois de l'échange .

6.2.2.1. Les cations échangeables dans les sols tropicaux.

Il est intéressant de connaître l'importance des cations échangeables du complexe dans les différents sols et la proportion prise par chacun d'eux .

L'état du complexe absorbant reflète assez bien les conditions générales de la pédogénèse dans un lieu considéré. Si la pluie est très forte et l'évacuation de l'eau convenablement assurée, les cations ordinairement fixés sur le complexe absorbant sont peu à peu enlevés et les bases peu abondantes. Le degré de saturation est faible à très faible et peut s'abaisser au-dessous de 10%, tandis que la somme des bases s'abaisse au-dessous de 1 mé/100 g.

Par contre, lorsque la pluie est faible, les bases sont difficilement évacuées, le degré de saturation dépasse 60-70% et tend vers 100%. La somme des bases dépend beaucoup du type de matériau originel et peut dépasser 10 mé/100 g.

En cas de mauvais drainage, il faut considérer:

1°. Les régions exoréiques à longue saison des pluies où la quantité d'eau est sans cesse renouvelée et évacuée. Dans ce cas, les bases sont éliminées, le degré de saturation, la somme des bases sont faibles .

2°. Les régions endoréiques où l'eau s'évacue du sol difficilement par gravité et se concentre sur place. L'accumulation des bases sur le complexe est alors forte .

Dans de très nombreux sols, le calcium est l'ion le plus abondamment représenté. Il est suivi dans l'ordre par le magnésium, le potassium et le sodium. On verra, dans le tableau n° 4 , l'importance des cations dans le complexe de quelques sols des zones intertropicale et méditerranéenne. Dans la classe des sols halomorphes, l'ion Na^+ prend une importance qu'il n'avait pas ailleurs; c'est pourquoi, il sert à qualifier cette classe. Il est utile de connaître à la fois sa valeur absolue et la proportion qu'il occupe par rapport aux autres cations fixés sur le complexe .

Une lixiviation abondante des sols aboutit au départ des ions métalliques, mais également à leur remplacement partiel par d'autres ions. Une eau acide se traduit par le remplacement des cations habituels par des ions H^+ . Toutefois, des études précises ont montré que les ions H^+ s'accompagnaient rapidement d'ions Al^{3+} qui provenaient de l'attaque des réseaux des minéraux argileux. Le déplacement de ces ions Al^{3+} peut aboutir à la longue à la formation d'hydroxydes d'aluminium . On a pu montrer que la présence de minéraux argileux riches en magnésium pouvait aboutir à une abondance d'ions Mg^{2+} sur les micelles à côté des H^+ .

Lorsque le matériau originel s'y prête, dans les mêmes conditions de forte acidité, on peut également avoir des ions Mn^{2+} fixés sur le complexe. Une quantité importante d'ions Al^{3+} ou Mn^{2+} sur le complexe entraîne pour un certain nombre de végétaux des phénomènes de toxicité allant jusqu'à la mort .

Les horizons A sont généralement plus riches en bases que les horizons B. La richesse de A dépend de la nature de l'activité biologique, de la nature du couvert végétal, de la profondeur du sol. D'une manière générale, en région intertropicale, une forêt,

par l'abondance de la matière organique qui lui est associée, provoque une richesse en bases souvent nette, surtout si les racines des arbres peuvent atteindre un horizon C où demeurent encore des minéraux altérables. Le remplacement de la forêt primaire par la savane s'accompagne, à coup sûr, par une diminution brutale de la matière organique et les bases. Il favorise l'érosion et l'acidification. L'horizon B, paraît moins sensible aux variations qui peuvent affecter l'horizon A et paraît mieux refléter les conditions générales de la pédogénèse .

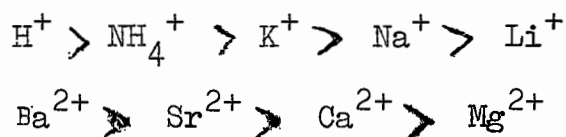
	S	Ca	Mg	K	Na
Sols ferrallitiques					
fortement désaturés	0,44	0,20	0,09	0,04	-
moyennement désaturés	1,30	0,53	0,54	0,03	-
faiblement désaturés	2,55	1,31	0,83	0,05	-
Sols ferrugineux tropicaux					
lessivés	3,16	1,82	1,23	0,11	-
peu ou pas lessivés	5,0	2,74	1,92	0,15	0,18
Sols tropicaux	16,7	13,6	7,0	0,07	0,05
Sols méditerranéens	29,5	22,0	3,13	0,38	0,88
Vertisols	21,7	15,09	4,78	0,37	1,44
Sols halomorphes	13,3	3,19	4,31	0,21	5,55

Tableau 4

6.2.2.2. Echangeabilité des cations.

La possibilité de remplacer un cation ou des cations par un autre a été observée depuis fort longtemps . Les premières expériences remontent à 1848. Beaucoup de travaux ont été effectués sur ce problème et les résultats obtenus sont parfois décevants et contradictoires. On peut dire avec certitude que :

a. L'efficacité du déplacement croît avec la valence, les ions divalents étant plus efficaces que les ions monovalents. A l'intérieur de ces deux groupes, l'efficacité se place dans l'ordre suivant :



Un ion bivalent ne correspond pas exactement à deux ions monovalents. Le pouvoir de déplacement n'est pas fonction uniquement de la taille, ni du degré d'hydratation, ni de la polarisation.

b. La nature de l'adsorbant influe particulièrement lorsqu'il y a deux cations en solution. Un matériau illitique fixera volontiers le potassium, tandis que le calcium est plus facilement retenu par un matériau montmorillonitique .

c. La concentration intervient également pour régler la fixation des cations. Lorsque la concentration en cations est faible, c'est le cation à valence la plus élevée qui se fixe le mieux; à concentration forte, c'est l'inverse qui se produit. Ceci est susceptible d'expliquer pourquoi, dans les sols des régions équatoriales ou tropicales aux solutions très diluées, c'est le calcium qui est le mieux retenu; tandis que dans les sols des régions subarides aux solutions plus concentrées, viennent se fixer davantage d'ions monovalents .

d. D'autres facteurs interviennent encore comme la nature des anions; une température et une humidité élevées favorisent également l'échangeabilité des cations .

6.2.2.3. Localisation des cations et lois d'échange.

La micelle élémentaire du sol est chargée négativement, pour les raisons qui ont été énumérées précédemment (telles que substitution, dans les couches tétraédriques ou octaédriques, ruptures sur les bords des cristaux, etc.) Il est donc nécessaire qu'il existe ^{des charges} de signe opposées pour neutraliser les premières. On convient que les charges négatives et positives sont très voisines à l'interface solide-liquide .

Divers systèmes ont été envisagés pour la répartition des charges positives au voisinage de cet interface. Pour HELMHOLTZ, les deux couches sont très rapprochées et en contact; pour GOUY et CHAPMAN, les charges décroissent régulièrement, pour STERN de manière exponentielle. Si l'existence de cette double couche est admise par tous, on ne sait pas avec certitude comment elle est disposée .

De nombreuses lois ont été proposées pour exprimer de manière chiffrée la façon dont les cations peuvent se remplacer les uns les autres. La loi de FREUNDLICH s'exprime par la relation :

$$y = kx^{1/p}$$

où y est la concentration d'un cation sur l'adsorbant.

x - - - - - dans la solution

k la constante d'équilibre

p une constante

6.2.2.4 Détermination des cations échangeables.

Le problème est double : l'extraction de ces cations du sol, le dosage des éléments extraits .

a. Extraction.

On peut extraire les cations échangeables en lessivant le sol avec un sel correspondant à un métal susceptible de se fixer sur le sol. En fait, de très nombreuses méthodes ont été préconisées, utilisant divers cations et anions. La méthode la plus habituellement utilisée est celle où se réalise le lessivage du sol par une solution normale et neutre d'acétate d'ammonium . Cette solution est peu sensible aux variations de pH; le déplacement d'ions comme ceux d' Al^{3+} ou Fe^{3+} est impossible; elle permet le déplacement de tous les ions alcalins et alcalino-terreux.

b. Dosages.

L'excès d'ions NH_4^+ dans la solution d'extraction est facile à éliminer par un chauffage modéré du résidu salin . Le traitement de ce résidu par un oxydant tel que l'eau oxygénée permet d'avoir facilement uniquement les oxydes qu'on transforme dans le sel de son choix .

Les méthodes traditionnelles de la chimie faisant intervenir gravimétrie et volumétrie sont maintenant remplacées, pour Na^+ et K^+ , par la spectrométrie de flamme. Cette méthode est utilisable également pour Ca^{2+} et Mg^{2+} , mais on la contrôle, pour ces deux éléments, par la complexométrie .

6.2.3. La Réaction du sol.

La notion de réaction du sol est assez complexe et couvre plusieurs choses qu'il est utile de dissocier. On distinguera

l'acidité " actuelle " qui s'exprimera par le pH, et l'acidité d'échange " qui pourra s'exprimer par une nouvelle mesure de pH ou bien par un nombre de milliéquivalents. Quelques mots seront consacrés au " pouvoir tampon " et à la relation entre le pH et le degré de saturation .

6.2.3.1. Définition du pH.

C'est l'inverse du \log_{10} de la concentration cations H^+ présents dans la solution du sol. Le complexe absorbant d'un sol est caractérisé par la présence d'ions Ca^{2+} , Mg^{2+} , ... H^+ . Un certain nombre d'ions H^+ sont libres dans les solutions du sol. Par des méthodes appropriées, on mesure leur concentration, d'où le pH qui s'exprime en nombres variant théoriquement de 1 à 14. En fait, la gamme de pH habituellement reconnue pour les sols va de 3 à 10 .

La qualification de l'acidité ou basicité d'un sol est la suivante :

3 à 5	très acide
5 - 6	acide
6 - 6,7	faiblement acide
6,7 - 7,3	neutre
7,3 - 8,5	basique
8,5 et plus	très basique

pH de quelques sols tropicaux et méditerranéens :

Sols ferrallitiques	4 à 6
Sols ferrugineux tropicaux	5,5 à 6,5
Sols rouges tropicaux	6,5 - 6,8
Sols rouges méditerranéens	7,5 - 8,2
Sols subarides	6,5 - 8,0
Vertisols	6,7 - 8,5
Sols halomorphes salins	7,0 - 7,5
" " à alcalis	8 à 10

Mesure du pH des sols.

On mesure habituellement le pH sur une suspension de sol où la proportion sol/eau est de 1/2,5.

Deux techniques sont utilisées :

a. Colorimétrie. On ajoute à la suspension une quantité connue de colorant et on compare la couleur obtenue avec celle qu'on obtient avec un mélange tampon de pH connu. Un certain nombre de colorants sont habituellement utilisés par exemple:

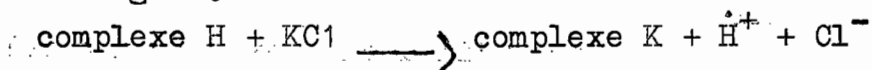
	pH de virage
Rouge de méthyle	5,0
Bleu de Bromothymol	7,0
Rouge de Crésol	8,0

Il est souvent nécessaire de flocculer l'argile en suspension par de la gélobarine, pour avoir un liquide surnageant parfaitement limpide.

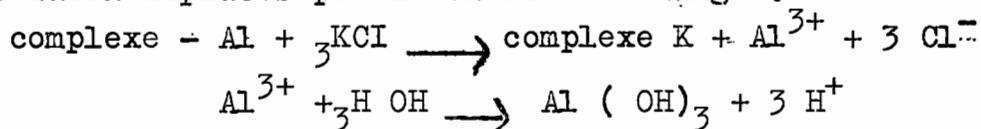
b. Potentiométrie. On réalise un potentiomètre où une demi-pile est constituée par une électrode de verre plongeant dans la suspension, tandis que l'autre électrode est une électrode au calomel. Les mesures sont plus précises mais, en raison de la fragilité de l'appareillage, doivent être effectuées en laboratoire.

6.2.3.2. Acidité d'échange.

La mesure effectuée précédemment donne une idée de l'acidité " actuelle " qui résulte de la présence d'ions H^+ libres dans les solutions du sol. Mais les ions H^+ fixés sur le complexe absorbant ne peuvent être mesurés qu'en les déplaçant par un autre ion. L'acidité ainsi mise en évidence est dite " acidité d'échange ".



La libération de ces ions H^+ supplémentaires a pour effet d'abaisser assez sensiblement le pH des solutions. Lorsqu'on mesure le pH d'un sol tropical, avec une solution de chlorure de potassium, on constate un abaissement souvent proche d'une unité (par rapport à la mesure faite dans l'eau pure. En réalité, la nouvelle acidité mesurée n'est pas due uniquement aux hydrogènes fixés sur le complexe, mais également aux ions aluminium . Ceux-ci sont aussi déplacés par le cation d'échange .



L'hydrolyse immédiate de l'ion Al^{3+} provoque la libération de 3 nouveaux ions .

Dans le cas des sols très acides tropicaux, l'acidité d'échange traduit donc l'existence à la fois d'ions H^+ et Al^{3+} fixés à la périphérie des micelles et facilement libérables. Dans le cas des sols très riches en fer, susceptible d'occuper la plupart des positions d'échange de H et Al, l'acidité libérée par un sel neutre est très faible . Il peut être intéressant de mesurer la part qui revient à l'hydrogène et à l'aluminium . Le sol est lessivé avec une solution de chlorure de potassium normal. On fait deux prises. Sur l'une, on effectue une neutralisation complète qui donne l'acidité d'échange totale. Sur la deuxième aliquote, on ajoute du fluorure de sodium et on fait bouillir. L'aluminium est complexé et l'acidité mesurée est alors uniquement celle des ions H^+ .

6.2.3.3. Pouvoir tampon des sols .

Ce pouvoir tampon est la capacité que présente le sol de résister aux variations du pH. C'est une propriété liée à la capacité d'échange du complexe absorbant, qui est due à la matière organique et à l'argile. Un sol très sableux dépourvu de matière organique et d'argile est donc pratiquement sans pouvoir tampon . La mesure du pH revient alors en fait à mesurer celle de l'eau.

6.2.3.4. Relation entre l'acidité et le degré de saturation.

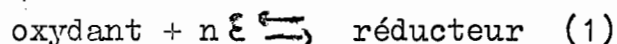
On a pu penser qu'il devait exister une relation entre le pH et V. En fait, on n'a jamais pu mettre en évidence une relation précise. On peut dire, en milieu tropical, que l'on a les relations suivantes dans les sols ferrallitiques à argile kaolinitique :

pH	V
3,7 - 4,5	5 à 10%
4,5 - 5,5	10 - 30
5,5 - 6,5	30 - 50
7 - 8	60 - 80

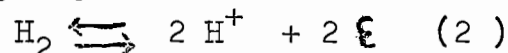
Dans les vertisols à argile 2 : 1, on a des degrés de saturation plus forts. A pH 6,6, - 80%; à pH 7, la saturation n'est pas encore complète. L'utilisation du pH et du degré de saturation a servi à caractériser le complexe absorbant des sols ferrallitiques et à la distinction des sous-classes.

6.2.4. Le Potentiel de Redox.

Lorsqu'un corps oxyde un autre corps, il est lui-même réduit et inversement. Ces transformations ont lieu par suite du transfert d'électrons.



Cette réaction peut s'appliquer au passage de deux ions de valence différente (fer ferrique ou fer ferreux) ou bien au passage de l'hydrogène moléculaire à la forme ionique.



Par analogie avec la notation pH, on posera que $r\text{H}_2$ est l'inverse du logarithme de la pression de l'hydrogène moléculaire.

$$r\text{H}_2 = \log \frac{1}{[\text{H}_2]} \quad (3)$$

Les valeurs de $r\text{H}_2$ se situent entre 0 (la pression de l'hydrogène est égale à 1 atmosphère) qui correspond à la réduction la plus forte, et 40 ou la pression de l'hydrogène est extrêmement faible (et celle de l'oxygène très forte). La valeur 27 correspond à l'équilibre entre l'oxydation et la réduction .

On peut également utiliser la formule de Nernst qui relie les concentrations des formes réduites et oxydées.

$$E_h = E_o - \frac{RT}{nF} \log \frac{[\text{Red}]}{[\text{ox}]} \quad (4)$$

E_h est le potentiel de redox et s'exprime en volts
 E_o est le potentiel " normal " de l'élément considéré
 n est le nombre d'électrons intervenant dans l'équation (1)
 R et F sont les constantes. T est la température absolue .

La relation entre E_h , $r\text{H}_2$ et pH est

$$r\text{H}_2 = \frac{E_h}{29} + 2\text{pH} \quad (5)$$

Mesure du Redox.

Elle peut se faire par voie colorimétrique ou potentiométrique.

a. Colorimétrie. On utilise la propriété pour certains colorants de changer de couleur suivant le potentiel de redox .

Le bleu de méthylène change de couleur à $r H_2$ 14

Le chloro-phénol-indophénol " à $r H_2$ 20

b. Potentiométrie . (mesure de Eh) On réalise une pile où une des électrodes est une électrode de platine mais cette mesure est délicate et doit être réalisée sur le terrain, les ions réduits ne subsistant pas dans leur intégrité au cours du transport et de l'oxydation qui en résulte toujours .

Application à l'étude de certains sols.

La mesure du potentiel de redox a été appliquée essentiellement à l'étude des sols hydromorphes. Différents auteurs ont constaté que le pseudo-gley correspond à un $r H_2$ de 25 environ, un gley à $r H_2$ de 20 et moins .

Il est toujours bon de considérer ensemble les conditions de pH et Eh. L'apport d'électrons nécessaires pour effectuer les réductions peut être beaucoup plus faible en milieu acide qu'en milieu neutre. C'est ce que l'on observe dans le cas du fer, de manganèse, du soufre, etc. Les phénomènes de réduction les plus intenses se manifestent dans les sols les plus acides (vases de mangrove par exemple).

Dans les rizières, on considère qu'un certain degré de réduction doit être atteint pour un bon développement des plantes, mais un excès de fer ferreux est toxique .

Peu de mesures ont été faites sur les sols à hydroxydes. Cependant, il est logique de penser que les sols ferrallitiques doivent avoir un potentiel de redox élevé toute l'année, du moins dans la partie supérieure des profils . Il ne doit pas en être de même dans les sols ferrugineux tropicaux, souvent fortement marqués par l'hydromorphie .

6.3. Caractérisation des constituants minéraux.

La détermination des constituants de la fraction argile des sols est une opération essentielle de la pédologie . En effet, la connaissance des constituants est susceptible d'aider à l'identification exacte du sol et de donner par là des indications sur ses propriétés et son mode d'évolution .

Différentes méthodes sont possibles; elles sont chimiques ou physiques .

6.3.1. Utilisation de méthodes chimiques.

C'était, pendant longtemps, la seule possibilité pour déterminer la constitution d'une argile. Deux problèmes sont posés : l'attaque du produit et le dosage des éléments constitutifs .

6.3.1.1. Attaque du produit.

Le choix du réactif d'attaque a une importance considérable. On a souvent préconisé l'emploi de réactifs alcalins fondus (fusion alcaline par un mélange de carbonates de sodium et potassium). Cette méthode permet l'attaque de la plupart des silicates secondaires, mais elle fait passer également en solution tous les silicates primaires ainsi que le quartz. Elle donne une idée globale du produit et ne fait pas de différence entre ce qui est primaire et ce qui est secondaire; elle convient beaucoup mieux à une roche qu'à un sol .

Le plus souvent, en pédologie, on utilise un réactif triacide comprenant 1 p. d'acide nitrique, 2 p. d'acide chlorhydrique, et 4 p. d'acide sulfurique. Ce réactif permet une séparation assez bonne des produits secondaires du sol (minéraux argileux, hydroxydes et oxydes), des minéraux primaires en particulier du quartz. L'attaque des produits par ce réactif permet une certaine systématisation des opérations et les dosages en série sont réalisables .

Il est toujours possible de déterminer un ou plusieurs constituants par un traitement, un réactif déterminé (le fer après attaque par l'acide chlorhydrique à l'ébullition), mais n'est jamais très sûr de l'attaque effectuée .

6.3.1.2. Dosage des éléments dans les solutions provenant des attaques précédentes.

Les dosages des éléments peuvent se faire par toutes sortes de façons. On peut avoir recours aux méthodes chimiques traditionnelles, par gravimétrie (silice), par volumétrie (fer, alumine, phosphore), par colorimétrie (titane, fer, alumine, manganèse, etc).

Il existe des techniques nouvelles faisant intervenir des réactifs appelés complexes (proches de l'acide éthylène diamino tétraacétique) qui permettent de doser des éléments voisins comme le calcium et le magnésium ; l'oxine (8-hydroxyquinoléine) permet également des dosages commodes de plusieurs éléments .

L'utilisation de techniques spectrométriques peut être préconisée pour le dosage d'éléments présents en faible quantité, ou bien lorsque les difficultés analytiques sont telles qu'il est préférable d'y avoir recours (sodium, potassium, par exemple). On peut utiliser la spectrométrie d'arc ou de flamme .

6.3.1.3. Détermination de constituants particuliers .

Il est de tradition de déterminer dans les sols tropicaux les hydroxydes et oxydes dits libres. Il s'agit essentiellement de produits alumineux et ferrugineux .

L'alumine libre faisait l'objet de déterminations fréquentes il y a une vingtaine d'années. Cette présence d'alumine libre était considérée comme une manifestation de la ferrallitisation et son estimation a suscité de nombreux travaux. Il s'agit, en fait, de déterminer la présence de gibbsite, boehmite ou clachite seuls produits alumineux des sols tropicaux . Deux méthodes ont été utilisées :

a. La méthode colorimétrique de HARDY (1931) consiste à utiliser la propriété de l'alumine de fixer certains colorants pour faire des laques. Le sol est chauffé à 800° et après refroidissement, mis en contact d'une solution d'alizarine sulfonate de sodium qui est d'autant plus fixée qu'il y a davantage d'alumine . Cette méthode donne des renseignements intéressants, mais n'est pas quantitative .

b. Un traitement commode consiste à traiter un sol par une lessive de soude diluée tiède. L'alumine des hydroxydes est facilement dissoute. Il suffit de la doser dans la solution obtenue.

La détermination du fer libre a fait l'objet de la mise en oeuvre de nombreuses méthodes. Certaines ont été longtemps utilisées et abandonnées, puis parfois remises en usage. Il s'agit par exemple du réactif à l'acide oxalique de TAMM (1934), du réactif à l'hydrogène sulfuré de TRUOG et ses collaborateurs (1936). Des réactifs utilisant des réducteurs ont été préconisés par la suite .

A l'heure actuelle, la plupart des laboratoires utilisent le réactif à l'hydrosulfite de sodium, préconisé par DEB en 1951, ou une des très nombreuses variantes qui en sont dérivées .

En fait, ces réactifs réducteurs attaquent incomplètement tous les produits ferrugineux non combinés du sol; par contre, ils sont susceptibles d'attaquer certains constituants comme la nontronite. Les résultats fournis par cette technique sont donc très loin d'avoir la valeur qu'on lui a prêtée, et doivent être interprétés avec beaucoup de circonspection.

Autres déterminations chimiques .

On a constaté que certains minéraux argileux adsorbent des colorants organiques en donnant des colorations qu'on a pu croire spécifiques. Malheureusement, leurs conditions d'emploi sont encore sujettes à caution et il est difficile de les utiliser seules. Diverses explications ont été présentées .

a) Le colorant se comporte comme une base qui réagit avec l'argile aux propriétés acidoïdes, soit naturellement, soit après traitement.

b) le fer trivalent contenu dans l'argile agit comme un oxydant sur le colorant .

Les colorants recommandés sont la benzidine, le vert malachite, le bleu de méthylène, la safranine Y .

	Argile non traitée par acide Benzidine	Argile traitée par un acide		
		Bleu de Méthylène	Sufra-nine Y	Vert Malachite
Kaolinite	0	bleu intense	rouge pourpre	vert-bleu
Halloysite	0		pourpre	jaune-vert
Montmorillonite	bleu pourpre	0	bleu pourpre	jaune rougeâtre
Nontronite	bleu-vert		rouge pourpre	vert bleu
Illite	0		rouge pourpre	vert-bleu

Tableau 5 - Colorations données par les principaux minéraux argileux des sols tropicaux .

6.3.2. Méthodes thermiques

Trois méthodes peuvent être préconisées : thermo- pondérale, thermique différentielle et dilatométrie. Elles sont basées toutes les trois sur les transformations subies par un minéral au cours du chauffage .

6.3.2.1. Analyse thermo-pondérale.

Lorsque l'on chauffe un échantillon de sol contenant des minéraux argileux et des hydroxydes, il perd des constituants volatils à des températures déterminées. Le plus fréquent est l'eau; on peut avoir également des départs de gaz carbonique.

La méthode la plus simple est la détermination par points . Elle consiste à placer un échantillon dans un four à température connue et effectuer la pesée lorsque l'équilibre est établi. Cette technique est facile à mettre en oeuvre et nécessite seulement un four réglable et une canne pyrométrique. Elle a été utilisée par BASTISSE (1947) et de nombreux autres chercheurs. Elle permet une détermination très convenable des pertes d'eau les plus importantes. Elle risque de ne pas permettre de détecter certains accidents importants. On a recours alors à la méthode d'enregistrement continu de CHEVENARD .

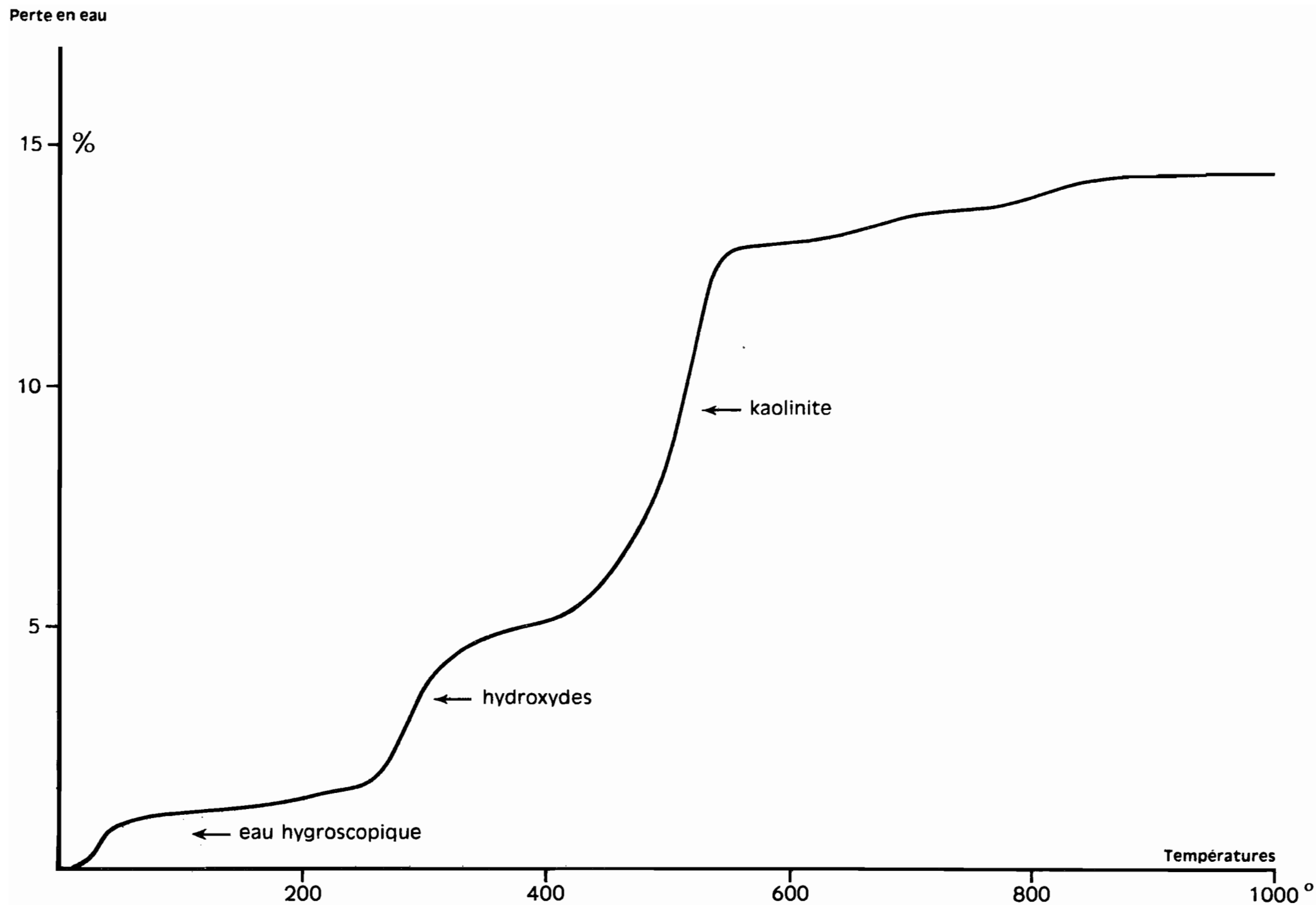
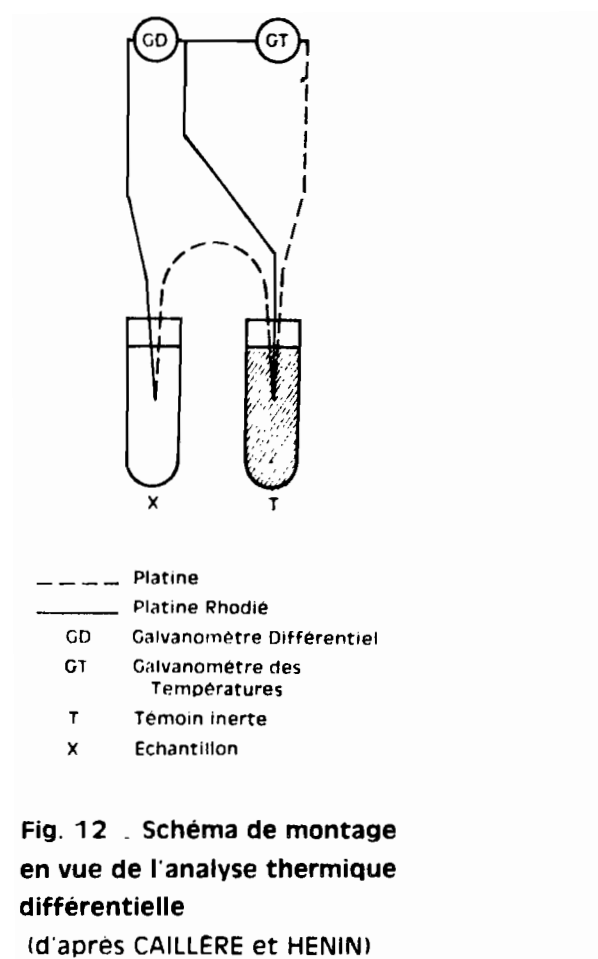


Fig. 11 - Exemple de courbe de perte en eau d'un échantillon de sol tropical contenant des hydroxydes de la kaolinite et un peu d'illite.



Le principe en est le suivant : l'échantillon à étudier est placé dans une nacelle accrochée à l'extrémité du fléau d'une balance. Cette nacelle est introduite dans un four dont on élève régulièrement la température. Les départs de substances volatiles se traduisent par le déséquilibre de la balance. L'autre extrémité peut être solidaire d'un miroir qui réfléchit un rayon lumineux dont on enregistre les déviations. On peut également, comme dans le cas de la balance Martin, adapter un contacteur électrique qui provoque le déplacement d'une chaînette rétablissant l'équilibre de la balance.

On obtient, grâce à l'analyse thermo-pondérale ainsi conduite, une courbe de perte de poids de l'échantillon en fonction de la température .

Les départs d'eau s'opèrent à des températures relativement stables et constantes :

- Hydroxydes de fer et alumine : 250°.
- Kaolinite : 450°.
- Montmorillonite : 100-200°.
- Oxydes : Néant .

6.3.2.2. Analyse thermique différentielle.

Principe de la méthode.

Il s'appuie sur la mesure des absorptions ou dégagements de chaleur qui se produisent lors de transformations qui ont lieu au sein d'une substance dont on élève régulièrement la température. Cette mesure est faite à l'aide de couples thermo-électrique dont l'un plonge dans la substance où peut se produire la transformation, l'autre dans une substance inerte (alumine ou argile préalablement calcinée). Au moment où se produit la transformation, un des couples va se trouver porté à plus haute température (réaction exothermique), ou à plus basse température (réaction endothermique) que l'autre. Il y aura, entre les deux couples, création d'une différence de potentiel que l'on enregistre. Un deuxième galvanomètre permet de suivre les variations de température au cours du chauffage . Les variations du galvanomètre sont couplées avec un système d'enregistrement photographique ou bien avec un enregistreur graphique .

Types de courbes d'enregistrement.

. Les oxydes ne donnent pas de crochets endothermiques dus à un départ d'eau. Par contre, la maghémite donne un crochet exothermique lors de la transformation en hématite .

. Les hydroxydes ont des crochets endothermiques à des températures de 300-350° pour la goethite et la gibbsite, de 450 à 600° pour la boehmite. La lépidocrocite présente un faible crochet exothermique à 270-350°.

. Les minéraux argileux ont des crochets endothermiques à des températures comprises entre 100 et 200°, correspondant au départ de l'eau située entre les feuillets; entre 500 et 650°, il s'agit de l'eau due au départ des hydroxydes de constitution. Il existe vers 900-1000° un crochet exothermique correspondant à une restructurations du minéral (kaolinite).

6.3.3. Emploi de rayonnements

6.3.3.1. Emploi des rayons X

Une partie importante des produits minéraux du sol sont cristallisés. Mais la taille des cristaux est si petite (moins de 0,5 μ) que les moyens habituels de la microscopie

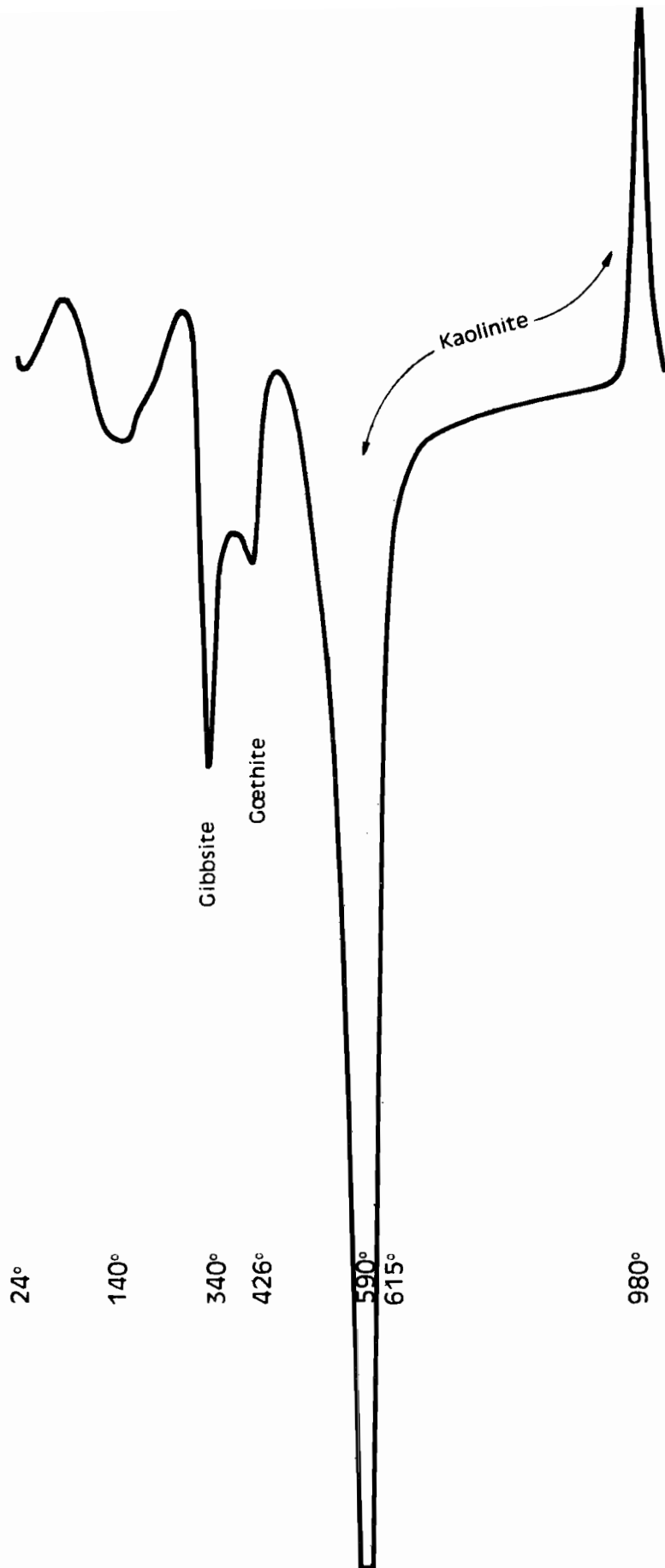


Fig. 13 - Courbe thermique différentielle d'un échantillon de sol tropical à goethite, gibbsite et kaolinite.

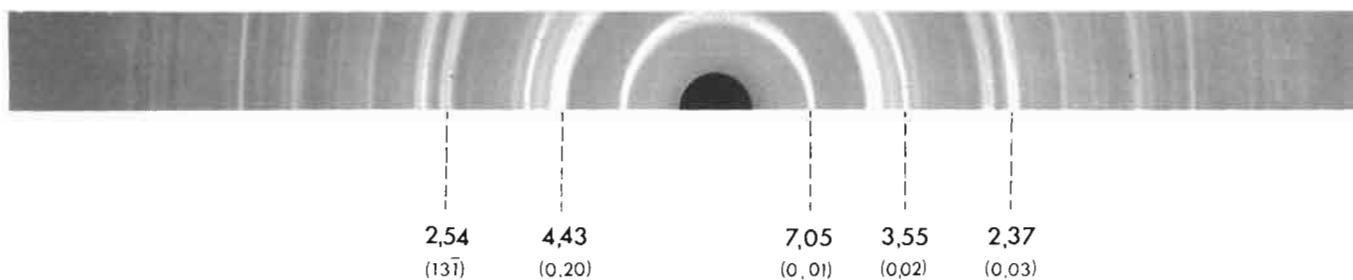


Fig. 14 — Diagramme X d'un échantillon de kaolinite, obtenu avec une chambre photographique avec les principales raies en A° . Le spectre a été obtenu avec une anticathode de cuivre en sélectionnant la raie $K\alpha = 1,5374$; diamètre de la chambre 114,6 mm.

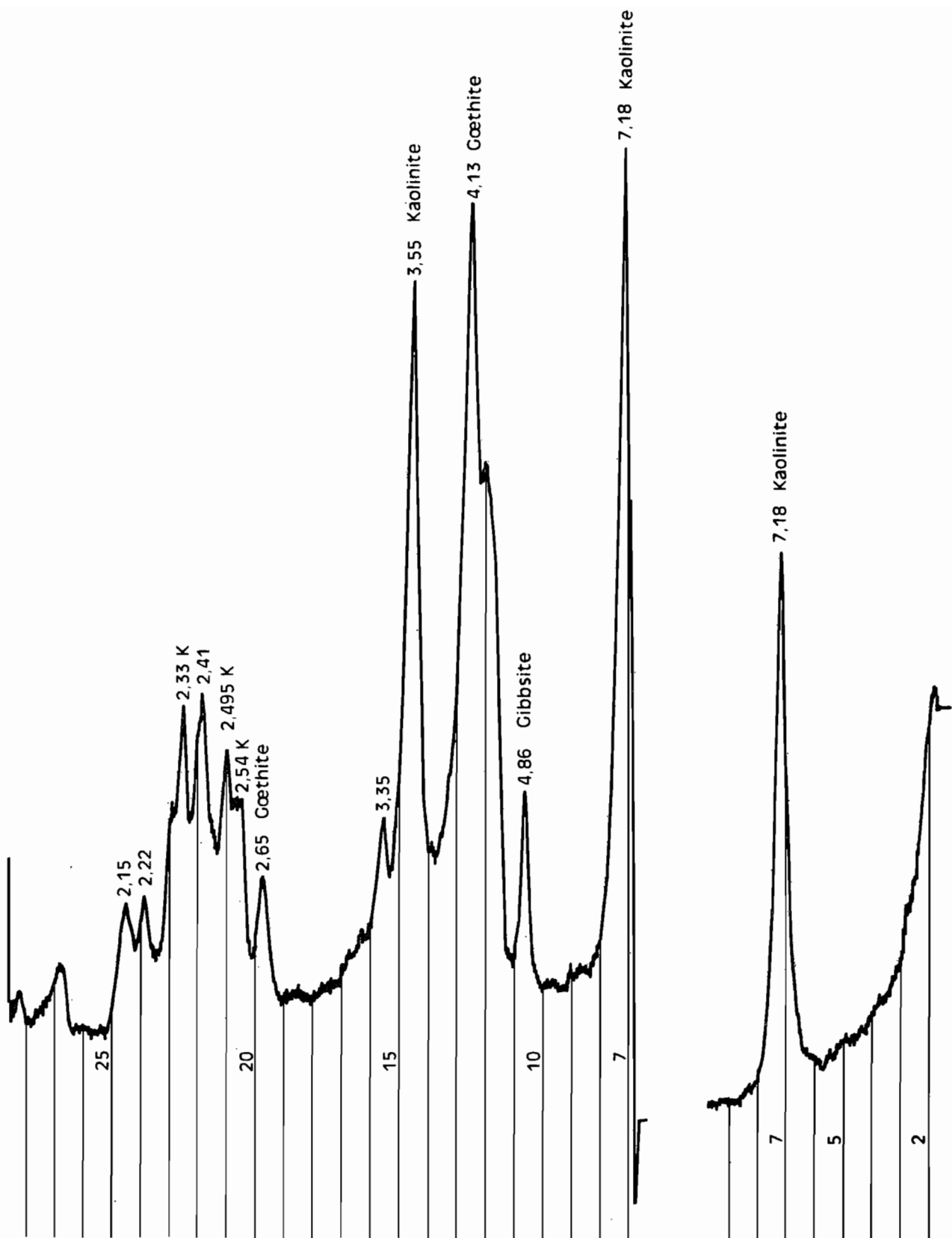


Fig. 15 - Diagramme X d'un échantillon d'argile de sol obtenu par emploi d'un diffractomètre équipé d'un compteur Geiger-Muller.

sont insuffisants pour les mettre en évidence. On a donc recours à l'emploi du rayonnement X. Celui-ci est produit dans une ampoule spéciale par bombardement, sous vide poussé, d'une surface métallique par un faisceau d'électrons. On sélectionne un rayonnement de longueur d'onde déterminé, que l'on dirige sur le produit à étudier, celui-ci diffracte ce rayonnement suivant une loi déterminée par BRAGG, et qui tient compte de la distance entre les plans principaux des cristaux. Deux techniques sont alors possibles :

. La première consiste à recevoir les rayons diffractés sur un papier photographique dans une chambre cylindrique. On note un certain nombre de raies dont l'espacement est caractéristique du minéral examiné (Fig. 14).

. La seconde à mesurer directement l'intensité du rayonnement à l'aide d'un compteur Geiger qui se déplace sur une circonférence dont l'objet étudié occupe le centre. On obtient un diagramme portant un certain nombre de pics propres aux produits étudiés (Fig. 15).

Chaque constituant cristallisé du sol fournit un diagramme comportant un nombre de pics ou raies caractéristiques, dont on peut trouver le détail dans les ouvrages spécialisés . La détermination qualitative des constituants peut être effectuée dans de très bonnes conditions; mais l'appréciation quantitative est encore très délicate .

6.3.3.2. Emploi du rayonnement infra-rouge .

Le rayonnement infra-rouge est de longueur d'onde beaucoup plus grande que celui des rayons X (1 à 15 μ). On utilise dans ce cas la propriété des substances d'absorber le rayonnement R en fonction de la longueur d'onde incidente. On détermine la proportion du rayonnement qui est absorbée par l'échantillon et on obtient une courbe caractéristique où on a I/I_0 en fonction de μ .

Les courbes sont caractéristiques des minéraux et correspondent à des types de liaisons interatomiques et non à un réseau comme pour les spectres X. Les spectres d'infra-rouges permettent donc d'étudier avantageusement les produits amorphes .

6.3.4. Emploi des Electrons.

Un faisceau d'électrons est utilisé dans un appareil appelé " microscope électronique " qui permet d'obtenir des photographies des particules constituant le sol . Les minéraux argileux présentent des assemblages ou " cristallites " assez caractéristiques. Celles de la kaolinite sont en forme hexagonale; l'halloysite se présente sous forme de tubes; la montmorillonite a l'apparence de nuages un peu flous. Les hydroxydes ou oxydes cristallisés peuvent être présents sous forme de ponctuations sur les surfaces des cristallites ...etc.

6.3.5. Interprétation des résultats. Calcul d'une formule .

Lorsqu'on cherche à établir la constitution d'un échantillon de sol, il y a toujours intérêt à grouper plusieurs déterminations, chimique, thermique, diagramme X, etc. et de confronter les résultats obtenus. Les renseignements d'ordre qualitatif obtenus devront être concordants.

Le sol (ainsi que l'argile extraits de ce sol) étant un milieu complexe, il est la plupart du temps très difficile de donner une composition minéralogique précise . Ceci explique pourquoi les minéralogistes se contentent de donner des indications vagues sur les quantités de minéraux identifiés.

Il est toutefois possible, dans certains cas simples (sols ferrallitiques à 2 ou 3 constituants majeurs : kaolinite, gibbsite et goethite par exemple), où une analyse chimique accompagne une détermination qualitative de fournir une composition centésimale approximative. Dans le cas ci-dessus, on attribuera toute la silice à la kaolinite, et l'on calculera la quantité d'alumine correspondante et par différence on aura la gibbsite. On calculera la quantité d'eau à leur attribuer; le reste sera adjoint au fer pour constituer de la goethite .

Dans le cas où il y a de l'illite, le potassium lui sera attribué et on soustraira la silice, l'alumine correspondants. Dans le cas de montmorillonite, le problème sera plus complexe, car une partie du fer devra lui être attribuée .

Lorsqu'il y a, en mélange, plusieurs minéraux argileux, et c'est un cas très fréquent dans les zones sèches de l'Afrique intertropicale et méditerranéenne, il devient très hasardeux de calculer, avec les moyens analytiques actuels, une formule précise. Il faudra se contenter d'une approximation .

Chapitre 7

L' ETUDE DU SOL AU LABORATOIRE

B.- CARACTERISTIQUES BIOLOGIQUES

7.1. La Flore.

7.1.1. Les Bactéries

Cycle de l'azote

Cycle du carbone

Autres éléments

7.1.2. Les algues

7.1.3. Les champignons

7.2. La Faune.

7.2.1. Les protozoaires

7.2.2. Les nématodes

7.2.3. Les vers de terre

7.2.4. Les microarthropodes (Acariens et Collembolés)

7.2.5. Les termites

7.2.6. Les autres insectes

7.2.7. Les groupes secondaires .

La vie se fait l'agent du climat dans l'évolution du sol et par l'énergie qu'elle utilise (photosynthèse de la flore), elle s'avère l'outil essentiel de cette évolution . Sans le travail de la vie, le sol ne serait en effet qu'un milieu pour cultures hydroponiques, c'est-à-dire un équilibre statique, alors qu'avec la vie se développent le cycle des matières organiques, l'humification des litières et le tamponnage chimique des sols. La vie, en fonction du pédoclimat et du milieu minéral, rend le sol plus ou moins organique et contribue à en déterminer les diverses propriétés .

On doit considérer les sols comme le siège des " équilibres dynamiques ", c'est-à-dire des équilibres qui résultent de très nombreuses forces interférant toutes directement ou indirectement entre elles et se modifiant avec le temps . Ces forces sont en effet saisonnièrement valables, mais à une plus grande

échelle de temps, elles évoluent aussi dans un sens généralement irréversible, d'où le dynamisme et l'évolution des équilibres pédologiques. Il existe pour chaque type de sol une succession d'équilibres qui lui est propre, de la roche-mère en voie d'altération au pédoclimat. Au sein de ces équilibres, les bactéries utilisent 60 à 80% de l'apport énergétique que représentent les débris végétaux et les cadavres animaux .

7.1. La Flore

7.1.1. Les bactéries.

Organismes unicellulaires de très petite taille, d'un demi-micron à quelques microns (1 micron = 1/1.000 de mm).

Les formes de bactéries sont peu nombreuses et pas immuables; elles peuvent varier avec l'âge des bactéries et les conditions du milieu: les formes, coques, microcoques, diplocoques, streptocoques, staphylocoques, bacilles, vibrions, spirilles et spirochètes sont les formes les plus connues et correspondent à des noms de genres. Certaines bactéries portent aussi des expansions flagelliformes .

Les bactéries dans le sol sont extrêmement nombreuses. Il peut en exister plusieurs milliards par gramme de sol, soit jusqu'à 1 kg de substance bactérienne au m² dans les sols les plus vivants. Ce plasma bactérien, invisible mais partout présent au sein du squelette minéral des sols, est défini en fonction de chaque équilibre pédologique .

Presque tous les aspects de la microbiologie du sol ont une portée sur la chimie du sol et participent à un cycle métabolique, tels les cycles fondamentaux de l'azote et du carbone .

7.1.1.1. Cycle de l'azote.

Quatre fonctions bactériennes différentes réalisent le cycle fondamental de l'azote, à savoir : la fixation de l'azote atmosphérique dans les molécules organiques, l'ammonification et la nitrification des protéines qui aboutissent à rendre de nouveau l'azote assimilable: et enfin la dénitrification, fonction longtemps controversée mais aujourd'hui reconnue comme allant de pair avec le bon état des sols .

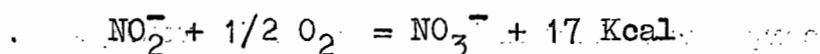
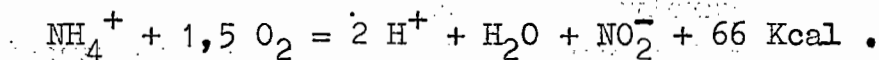
La fixation de l'azote atmosphérique est effectuée par :

1. des bactéries aérobies libres : *Azotobacter*, *Beijerinckia*, quelques bactéries photosynthétiques et quelques oligonitrophiles.
2. des bactéries anaérobies libres : *Clostridium*.
3. des bactéries symbiotiques : *Rhizobium* des légumineuses.
4. certaines algues cyanophycées .

Les divers éléments minéraux présents dans le sol, (P, Ca, Fe, Mg, Mo, S, K.) ainsi que le pH et l'humidité influencent fortement l'activité fixatrice de ces bactéries; l'humus paraît avoir sur elles une influence plus limitée .

L'ammonification est une réaction plus ordinaire, réalisée par un très grand nombre d'organismes. L'ammoniac libéré se fixe dans le sol (au maximum dans les sols acides), s'inclut dans les molécules d'acides préhumiques, s'oxyde en nitrites et nitrates, ou se perd dans l'atmosphère quand les substances azotées prédominent sur les substances hydrocarbonées. Ces pertes dans l'atmosphère apparaissent particulièrement importantes dans les pays équatoriaux chauds et humides; pays où en contre partie les orages par les éclairs synthétisent du peroxyde d'azote et peuvent enrichir les eaux de pluie en acide nitrique. Les ions NH_4^+ adsorbés sur le complexe d'échange de bases sont préférentiellement nitrifiés par les microorganismes du sol, car l'addition d'un sol nitrifiant à un sol stérile augmente son pouvoir nitrifiant proportionnellement à la capacité d'échange du sol ajouté. Les bactéries nitrifiantes, comme les autres bactéries, demeurent essentiellement à la surface des agrégats .

La nitrification est effectuée d'abord par des bactéries nitreuses des genres Nitrosomonas, et à un degré moindre Nitrosococcus, Nitrospirae et Nitrosocystis et ensuite par des bactéries nitriques du genre Nitrobacter. Les deux principales réactions de la nitrification, bien que s'effectuant par étapes, peuvent se résumer ainsi :



La présence de Ca, P, Mg, Fe et Cu est nécessaire aux bactéries nitrifiantes .

FIGURE 1 - CYCLE DE L'AZOTE

La dénitrification enfin est effectuée par de nombreuses bactéries utilisant l'oxygène des nitrates pour oxyder une autre substance (le NO_3^- étant alors réduit en NO_2^- ou N_2) et aussi par des bactéries qui réduisent directement NO_3^- en N_2 .

7.11.2 Cycle du Carbone.

Le carbone est apporté au sol par les débris végétaux et les cadavres de la faune, mais aussi les fumures et les engrais verts. La décomposition de ces apports organiques s'effectue sous l'action de la faune et de la microflore. Elle est selon les mois plus ou moins rapide, conduit à des produits de nature différente et s'accompagne d'une synthèse plus ou moins importante de substances préhumiques.

Les glucides donnent divers corps intermédiaires, des acides organiques, du gaz carbonique et de l'eau.

La cellulose dans la nature est généralement liée à la lignine, aux héli-celluloses et aux pectines; les pecto-celluloses sont plus facilement attaquées que les ligno-celluloses. De nombreuses bactéries et de nombreux champignon peuvent attaquer la cellulose.

La glucose apparaît être le stade final le plus habituel de la dégradation aérobie de la cellulose. Il est réutilisé immédiatement par les bactéries. Divers autres sucres, ainsi que des acides organiques et des gommes peuvent aussi se former. En anaérobiose, de nombreux bâtonnets sporulés dégradent la cellulose (famille des *Clostridium* par exemple). Les produits de dégradation sont alors des acides organiques et des gaz dont le méthane.

La lignine, très résistante, n'est dans les régions tempérées que très lentement attaquée, notamment par les champignons. Elle peut donner des acides tanniques et des glucides phénoliques qui, en milieu alcalin, se polymérisent et s'oxydent en donnant des acides humiques.

Les pectines donnent des acides organiques, des alcools et des gaz, ou sont hydrolysés en sucres.

Les lipides et les cires se dégradent très lentement en donnant souvent des corps gras insolubles et parfois toxiques.

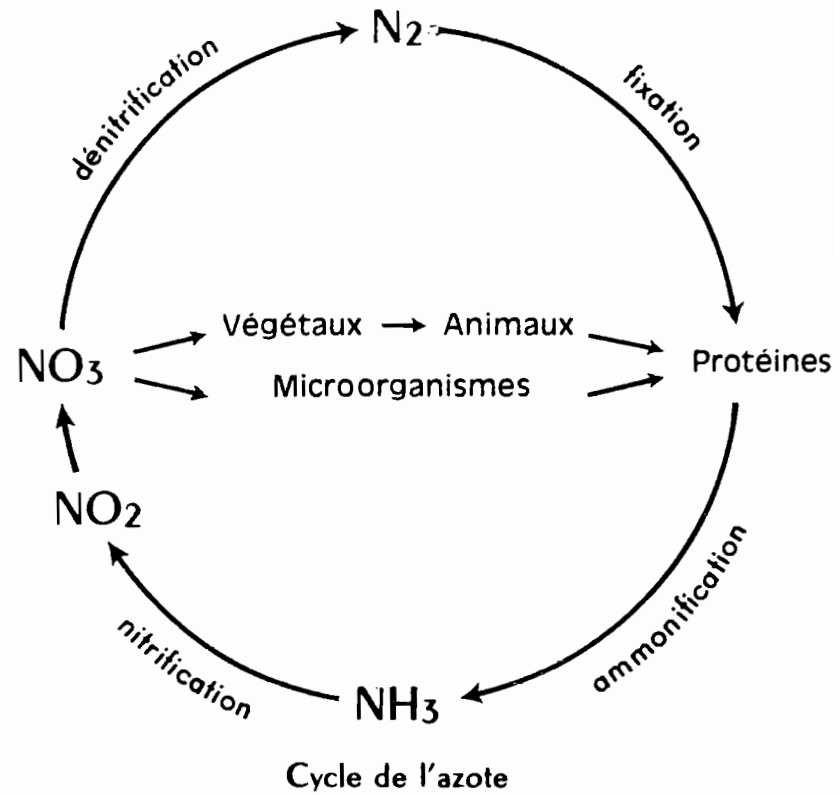


Fig. 16 - Le cycle de l'azote dans les sols

Les cycles du carbone et de l'azote sont liés entre eux, du fait des besoins en azote des divers organismes vivants, qu'il s'agisse des besoins en nitrates des plantes ou du besoin en ammoniac de certaines bactéries .

Le rapport C/N correspond pour chaque sol à un équilibre bien défini et s'avère très utile à connaître .

7.11.3. Autres éléments .

. Le Soufre .

De très nombreuses bactéries hétérotrophes, dites de la putréfaction, peuvent décomposer les protéines soufrées des organismes vivants . Certains champignons et Actinomycètes peuvent aussi participer à la décomposition du soufre organique. Cette décomposition conduit en aérobose à des acides aminés soufrés, à des mercaptans, à du soufre métalloïdique, à du soufre plus ou moins oxydé ($S_2O_3^{--}$ et SO_3^{--}) et même des sulfates. Le SH_2 apparaît principalement dans les conditions d'anaérobiose .

Le soufre organique après minéralisation est repris par des bactéries, en majorité autotrophes qui progressivement l'oxydent en sulfates, assimilables par les plantes.

. Le fer .

La minéralisation du fer organique est effectuée par la plupart des bactéries qui s'attaquent aux matières organiques . Le fer, selon les circonstances, est libéré sous forme oxydée ou réduite. Des bactéries aérobies et anaérobies peuvent oxyder le fer, mais la plupart du temps l'oxydation du fer et son inclusion dans les complexes ferro-humiques et ferro ou ferrisiliciques s'effectuent dans les sols essentiellement par voie chimique. Il semble que les bactéries dans les sols jouent surtout sur l'état du fer en influençant le potentiel d'oxydo-réduction et le pH du milieu. Les bactéries oxydantes du fer paraissent avoir un rôle plus important dans les eaux que dans les sols .

. Le Manganèse .

Les plantes peuvent présenter des carences en Mn dans des sols qui en sont bien pourvus, notamment dans les sols organiques et calcaires. Seul le Mn^{++} (Mn adsorbé, Mn O ou $Mn(OH)_2$) est reconnu assimilable par les plantes; le Mn^{+++} et le Mn^{++++} (MnO_2) ne paraissent pas assimilables .

Les microorganismes, selon les circonstances, peuvent aussi bien oxyder le Mn divalent que réduire le Mn trivalent ou le Mn quadrivalent .

Dans les sols neutres ou légèrement alcalins, l'oxydation biologique conduit souvent tout le Mn sous ^{1a}forme MnO_2 . Dans des conditions d'anaérobiose, en pH acide, ou en présence d'un abaissement du potentiel d'oxydo-réduction, le Mn tend au contraire à être réduit , aussi bien par un processus purement chimique que par les microorganismes.

Le MnO_2 dans les sols agit comme un oxydant énergique ou un accepteur d'hydrogène dans une grande variété de systèmes biologiques . En oxydant notamment les composés thiols, le MnO_2 joue un rôle protecteur des organismes du sol et s'avère un facteur de la fertilité du sol (QUESTAD, 1955).

L'oxydation biologique du Mn dans les sols apparaît liée à celle du fer ferreux, d'où souvent la présence dans les sols qui bordent les marais tropicaux de concrétions noires composées de fer et de manganèse .

. Le Phosphore .

Présent dans plusieurs minéraux (tel l'apatite $Ca(OH)_2$ $3 Ca_3(PO_4)_2$), le phosphore existe dans le sol sous forme minérale et sous forme organique .

Ses formes minérales dans le sol sont particulièrement complexes. D'une part, il existe un équilibre constant entre les ions PO_4^{3-} en solution et les ions PO_4^{3-} adsorbés et échangeables, et d'autre part le phosphore peut rétrograder sous des formes peu ou non solubles; rétrogradation favorisée aussi bien par le calcaire que par les sesquioxydes de fer et d'aluminium .

Il est apparu que les transformations du phosphore ionique généralement de nature physico-chimique, pouvaient aussi souvent être de nature biologique. Les microorganismes peuvent solubiliser et mobiliser le phosphore pour les plantes ainsi que l'assimiler pour eux-mêmes; il peut exister une faim de phosphore comme il existe une faim d'azote .

. Divers .

Les microorganismes, en assurant la décomposition des matières organiques, ou en contribuant à l'altération des silicates (silicobactéries) libèrent de nombreux autres éléments chimiques, dont certains, comme le potassium, intéressent directement la nutrition des plantes. Les microorganismes peuvent aussi participer à la transformation d'éléments secondaires comme l'arsenic .

Inversement, de nombreux éléments chimiques sont aussi nécessaires au métabolisme des microorganismes, tel le molybdène pour les bactéries fixatrices d'azote et les bactéries ou plantes assimilant les nitrates, tel le bors nécessaire à la symbiose Rhizobium-légumineuses et d'une manière plus générale à la vie de très nombreuses algues et bactéries, tel aussi le cobalt présent dans la vitamine B 12 que synthétisent de nombreux microorganismes. Le cuivre et le zinc sont aussi des oligo-éléments indispensables aux plantes et aux microorganismes .

Techniques .

Par des mesures d'activité respiratoire (dégagement de gaz carbonique et absorption d'oxygène), par des tests enzymatiques (1) et par un examen de la microflore totale (numération microscopique directe des germes en fluorescence ou numération indirecte sur plaques de gélose à l'extrait de terre), on peut déjà voir si le sol est " vivant " et juger de son potentiel d'activité biologique .

Par des apports appropriés au sol, ou par des ensemencements avec des solutions-dilutions de terre dans un milieu sélectif, on estime le développement possible que peuvent prendre les diverses fonctions physiologiques du sol . La mesure du pouvoir nitrifiant des sols est ainsi couramment pratiquée .

On peut aussi rechercher les fixateurs d'azote aérobies et anaérobies, avec numération possible des Azotobacters, les bactéries protéolytiques, les ammonificateurs, les nitrificateurs et

(1) Les tests enzymatiques diffèrent des autres mesures d'activité globale par le fait qu'ils sont pratiqués en conditions anti-septiques après traitement des échantillons au toluène, exception faite toutefois de quelques mesures d'activité comme celle de la déshydrogénase .

les dénitrificateurs, avec évaluation comparative du pouvoir de ces bactéries en fonction du temps et des dilutions, les cellulolytiques aérobies et anaérobies, les amylolytiques, hémicellulolytique ou autres glucydo-lytiques, ainsi encore que les diverses bactéries du soufre .

Pour ce qui est des techniques, on se réfère à POCHON (1954) et POCHON et TARDIEUX (1962).

7.12. Les algues .

Les algues du sol sont très proches de celles que l'on rencontre dans les eaux douces, à savoir : des algues à pigments chlorophylliens, à réserve d'amidon et à multiplication par division (Chlorophycées), des algues à pigments caroténoïdes et xanthophylliens à réserves grasses et à reproduction par division ou par zoospores, parfois sexués (Xanthophycées), des algues à test siliceux formé de deux moitiés qui s'emboîtent (Diatomées) et des algues à pigments variés non localisés dans des chromatophores, à noyau primitif et à membrane souvent gélatineuse (Cyanophycées : Nostoc Oscillatoria).

A la lumière, ces algues sont autotrophes et utilisent le carbone minéral, mais dans les sols, pour des raisons d'humidité, elles se localisent souvent un peu au-dessous de la surface, se trouvent donc à l'obscurité et utilisent le carbone organique des débris végétaux et des plasmas bactériens .

Les algues sont les plus nombreuses dans les sols assez organiques, humides et possédant de préférence une certaine teneur en azote assimilable. Elles se développent aisément en laboratoire sur des milieux peu minéralisés .

Leur rôle dans les sols apparaît comme assez secondaire; leur activité principale paraît être de fixer une très faible fraction de l'azote sous forme organique et d'influencer la vie bactérienne à laquelle elles sont étroitement associées .

. Techniques .

On recherche les algues du sol en ensemençant des milieux liquides ou solides appropriés par des suspensions-dilutions de terre (cf. POCHON , 1954).

7.13. Les champignons .

Les champignons ne possèdent pas de pigment assimilateur comme les algues ou les autres plantes vertes et sont formés d'une association de cellules sans vaisseaux conducteurs (thalle). Les champignons diffèrent des bactéries du fait que leurs cellules possèdent un noyau et une membrane. Tous sont hétérotrophes et se nourrissent de carbone organique .

Les champignons inférieurs (siphomycètes) ont un thalle ramifié mais non cloisonné, exception faite cependant au niveau des organes de reproduction ou dans certaines circonstances particulières. Les Mucorales sont parmi les Siphomycètes du sol particulièrement actifs dans les horizons supérieurs des sols humides et sur les débris végétaux et animaux en début de décomposition .

Les champignons supérieurs (Septomycètes) ont un thalle cloisonné et généralement très ramifié. On y distingue les Ascomycètes, les Basidiomycètes et les " Fungi imperfecti ".

Les champignons recherchent en majorité les sols aérés et, contrairement aux bactéries, s'avèrent en général tolérants à l'acidité. Des conditions humides et une douce température sont aussi favorables au développement des champignons .

Les champignons ont une action positive sur la structure des sols, tant par l'adhérence de leurs filaments mycéliens que par les substances mucilagineuses qui résultent de l'attaque bactérienne de leur mycélium . Ils jouent un rôle important dans la dégradation des matières organiques et synthétisent des protéines cellulaires à partir des composés carbonés et azotés du sol. De nombreux champignons ont le pouvoir d'attaquer la cellulose et la lignine . Par leur production d'antibiotiques, qui peuvent influencer aussi bien les microorganismes que les plantes vertes, ils s'avèrent un des éléments essentiels de l'équilibre des sols. Par leur participation aux manchons vivants qui entourent les racines, ils contribuent à l'établissement de rapports biochimiques étroits entre microorganismes et végétaux supérieurs .

A mi-chemin entre les champignons et les bactéries se situent les Actinomycètes. Ils sont très nombreux dans les sols et y ont une grande importance, notamment sur la croissance des plantes et l'équilibre de la microflore. Certains secrètent des corps noirs de nature humique .

. Techniques .

Les numérations de champignons, faites par mode direct au microscope, ou par mode indirect avec l'ensemencement de dilutions de sol sur plaques à la gélose, sont très douteuses. Les milieux de culture sont très sélectifs et pour la plupart des espèces encore totalement inconnues.

7.2. La Faune.

La faune des sols demeure essentiellement dans les horizons de surface où se localise le potentiel énergétique et alimentaire constitué par les débris végétaux. Certains animaux, comme les vers, les termites et autres fouisseurs, bien que se nourrissant en surface, descendent cependant en profondeur et déterminent dans les sols des voies de pénétration pour les autres animaux qui doivent migrer saisonnièrement .

La densité des animaux qui constituent les grands groupements faunistiques du sol doit être considérée en fonction de la biomasse et de l'activité que représentent ces animaux au sein des sols. Il est aussi nécessaire de considérer la diversité des animaux au sein des divers groupements fauniques; les sols qui offrent des conditions très favorables renferment de nombreuses espèces représentées par peu d'individus, alors que les sols à conditions extrêmes renferment peu d'espèces représentées par de nombreux individus .

7.2.1. Les Protozoaires

Selon les sols, les protozoaires au mètre carré varient de 100 à 1.000 millions, soit un poids de quelques grammes à quelques dizaines de grammes. Les Flagellés sont généralement les plus nombreux, les Ciliés les moins nombreux .

La majorité des protozoaires du sol peuvent s'enkyster, y compris les thécamoébiens déjà protégés par leur coquille. Les kystes sont très résistants et aisément transportables par le vent, d'où le cosmopolitisme de très nombreux protozoaires.

Les protozoaires ont une très grande possibilité de multiplication et il est connu qu'un infusoire placé dans des conditions idéales pourrait théoriquement, en se multipliant, donner une masse de matière vivante égale à celle de la terre en un mois .

D'une manière générale, ainsi que nous le montrent les mesures de dégagement de gaz carbonique, l'activité globale des bactéries s'accroît en présence des protozoaires prédateurs, car en détruisant les bactéries, les protozoaires stimulent leur développement et leur activité. Dans les sols riches en protozoaires, les azotobacters sont plus actifs, l'ammonification plus intense, les antibiotiques voient leur force diminuer et d'une manière générale, les divers processus métaboliques du sol se trouvent favorisés .

. Techniques.

Pour étudier les protozoaires, on cultive les bactériophages sur une souche bactérienne appropriée, et les saprophages sur une infusion de foin ou un extrait de sol. Leur numération s'effectue par dilution d'un poids de terre donné, ensemencement calculé et calcul statistique à partir des cultures restées négatives .

7.22. Les Nématodes.

Les nématodes sont des vers ronds dont le corps n'est pas segmenté et qui ne possèdent pas de soies . De tous les organismes pluricellulaires, les nématodes sont certainement les animaux les plus abondants et les plus répandus sur le globe. Presque tous les animaux et végétaux sont parasités par les nématodes. Les nématodes libres des sols sont aussi extrêmement nombreux. Ils ont en moyenne 0,5 à 2 mm de longueur et sont 20 à 50 fois moins larges que longs, ce qui les rend pratiquement invisibles à l'oeil nu; il en existe cependant quelques rares formes géantes.

Les nématodes sont surtout abondants dans les sols riches en matières organiques et à régime assez humide. Ils se rencontrent principalement dans les débris végétaux en décomposition et les 10 ou 20 premiers centimètres des sols, où l'on peut en trouver selon les circonstances de 1 à 30 millions au mètre carré .

Tous les nématodes sont des animaux aquatiques, et quand l'eau vient à manquer, les nématodes selon les espèces meurent, passent en vie ralentie, se déshydratent ou s'enkystent. Les kystes de nématodes peuvent demeurer en vie de nombreuses années.

Tout au moins sous les climats tempérés, les nématodes paraissent favoriser les processus d'humification. Peut-être favorisent-ils aussi la stabilité structurale des sols. Ils forment un vaste groupement qui, dans les végétaux en décomposition, apparaît après les bactéries et après les protozoaires, mais avant les microarthropodes. Plusieurs champignons s'attaquent aux nématodes .

. Techniques .

Les nématodes sont extraits des sols par des entraînements à l'eau suivis de tamisages ou par des techniques d'élutriation; les appareils d'élutriation sont basés sur le principe d'une sédimentation du sol opposé à un courant d'eau calculé pour maintenir en hauteur les particules d'un certain diamètre et les nématodes d'une certaine taille. Les nématodes récoltés sont comptés dans des cellules spéciales de type hémotimétrique .

7.2.3. Les vers de terre (Enchytraeides, Lumbricides, Megascolécides)

Les Enchytraeides sont des vers de petite taille (2 à 30 mm environ), les autres vers sont de taille plus grande .

La plupart des vers de terre ont une période de diapause en été, période pendant laquelle, le tube digestif vide, ils demeurent enroulés sur eux mêmes dans une cavité sphérique consolidée par une sécrétion . Ces cellules d'estivation peuvent ultérieurement se trouver fossilisées par un remplissage de terre humifère entraînée en profondeur ou par un dépôt de carbonate de calcium dans les horizons profonds des sols calcaires .

Les vers de terre se nourrissent généralement à partir des débris végétaux en décomposition qu'ils ingèrent mélangés à de la terre. Les vers incorporent ainsi au sol la litière végétale, soit en la mangeant directement en surface, soit après l'avoir enfouie dans les galeries . Dans le choix de leur nourriture, les différents vers manifestent des préférences variables selon les milieux .

Les vers de terre sont étroitement liés à l'humidité des sols, à leur pH, à leur teneur en calcium, à leur salinité et à leur potentiel d'oxydo-réduction ou rH_2 . L'atmosphère, la texture et la température du sol conditionnent aussi la présence et l'activité des vers .

Dans les sols bruns des régions tempérées et notamment dans les sols de jardin, on peut avoir plusieurs tonnes de vers à l'hectare. Un bon pâturage supporte plus de vers que de gros bétail. Là où les vers existent, ils forment entre 50 et 75% de la biomasse et leurs excréments déterminent la structure mull du sol.

Les galeries des vers, comme celles des autres animaux, servent de voie de pénétration aux animaux non fouisseurs et, une fois remplies de terre humifère entraînée en profondeur par les eaux, forment des voies préférentielles de pénétration pour les racines.

Les rejets de surface ou "turricules" que font les vers sont bien connus, mais tous les vers ne font pas de rejets en surface et l'importance même des rejets varie avec la nature des sols; ils sont plus importants dans les sols lourds que dans les sols légers. Dans les régions tempérées, on peut avoir, selon les conditions, des rejets annuels de surface d'environ 200 à 400 Kg à l'are et même plus dans certaines prairies humides, soit un dépôt de surface de plusieurs millimètres en quelques années. Les 10 cm supérieurs d'un sol de pâturage passent alors en entier par le tube digestif des vers en 10 à 20 ans. Dans les régions intertropicales, certains sols particuliers de dépression peuvent être recouverts chaque année par plus de 2 tonnes de rejets à l'are; les turricules des vers constituent alors un véritable horizon de surface (sols "dentelles" du Nord Cameroun, sols de la vallée du Nil blanc).

Les vers tendent à homogénéiser les profils, ou au contraire dans certains sols à déterminer par leur activité un horizon supérieur distinct reposant sur un lit de cailloux progressivement enfoui. Le travail mécanique des vers correspond à un labour profond des sols, avec dispersion de la microflore et de la microfaune.

Les vers améliorent la stabilité structurale des sols en mélangeant intimement les composés organiques en voie de décomposition à la fraction minérale des sols et en y ajoutant pour certains des sécrétions calcaires.

Ils améliorent aussi fortement la macroporosité des sols par leurs galeries et leurs rejets, et favorisent indirectement la microporosité par l'enfouissement des débris végétaux, enfouissement qui détermine une activité plus importante de la microfaune et de la microflore en profondeur .

L'amélioration de la porosité des sols en permet une meilleure aération, sans que, pour autant, leur humidité ne s'en trouve diminuée, car la capacité de rétention d'eau se trouve généralement accrue par ailleurs grâce à un complexe colloïdal plus humique . En conséquence de ces améliorations, les sols à vers sont généralement plus résistants à l'érosion, exception faite sur les pentes où l'érosion peut au contraire entraîner énergiquement les turricules .

Tous les vers n'ont pas la même action sur les sols et cette action reste en grande partie fonction de leur biologie .

Chimiquement, les rejets des vers sont généralement plus riches que le sol et le rapport entre les diverses bases échangeables n'y est généralement pas le même . Les vers sont aussi capables de rendre assimilables pour les plantes de très nombreux oligo-éléments (tel le molybdène), et inversement la disparition de vers peut parfois entraîner l'apparition de carences minérales. Les vers favorisent la nitrification des composés organiques azotés tout en constituant par eux-mêmes une importante réserve d'azote. Ils accroissent enfin très nettement le bagage enzymatique des sols, en rendant ces derniers biologiquement plus actifs .

Les excréta des vers sont en général plus proches de la neutralité que les sols correspondants .

De tout ceci, il résulte que les vers de terre presque toujours ont une action favorable sur la fertilité des sols . Ils améliorent la flore des pâturages et la qualité des récoltes . Ce sont des animaux très utiles dont nous connaissons mieux l'action dans les régions tempérées que dans les régions intertropicales, où leur action apparaît parfois plus limitée à un travail d'ordre essentiellement mécanique .

. Techniques .

On peut capturer les vers de terre par bêchage, par lavage et tamisage du sol, ou par des aspersions chimiques qui font remonter les vers en surface; le permanganate et le formol sont pour cela les agents chimiques les plus actifs. On peut aussi extraire les vers du sol par un courant électrique approprié.

Pour les Enchytraeides, leur extraction s'effectue en plaçant la terre dans une toile fine, suspendue dans un entonnoir plein d'eau et surmonté d'une lampe chauffante. En 2 jours les Enchytraeides recherchant les eaux plus fraîches et plus aérées descendent dans l'entonnoir à la base duquel on les récolte .

7.2.4. Les microarthropodes (Acariens et Collemboles).

Les Acariens sont des arthropodes sans antennes, ayant des chélicères et quatre paires de pattes .

Mesostigmates, Thrombidiformes, Acaridiés et Oribates se rencontrent dans les sols. Les Oribates constituent souvent plus de la moitié des Acariens du sol et s'attaquent pour la plupart aux débris végétaux, mais ne participent pas au mélange direct des matières organiques avec les matières minérales du sol .

Les Collemboles sont des insectes primitifs n'ayant jamais développé d'ailes. Comme tous les insectes, ils ont une paire d'antennes et 3 paires de pattes thoraciques. La plupart des Collemboles s'attaquent de préférence aux litières végétales en voie de décomposition.

Les microarthropodes vivent étroitement sous la dépendance des conditions du milieu : humidité, profondeur de l'horizon organique, macroporosité, etc. D'après les différents auteurs, les sols forestiers peuvent facilement héberger de 100.000 à 500.000 acariens et 200.000 collemboles au mètre carré, soit approximativement une masse vivante de 4 grammes. Dans les sols de prairie, les sols cultivés et les sols sous conifères, les microarthropodes sont généralement beaucoup moins nombreux .

Dans les sols, les microarthropodes contribuent à la fragmentation fine de la litière et marquent un stade dans la dégradation des débris végétaux, mais en dépit de leur nombre

les collemboles et les acariens ne paraissent cependant pas détruire plus de débris végétaux que certaines larves de Diptères dont l'action réductrice est bien plus importante, quoique plus limitée dans le temps. Les microarthropodes accélèrent aussi les divers processus bactériens, y compris, selon les conditions microclimatiques, ceux de l'humification et de la déshumification .

. Techniques .

L'extraction des microarthropodes s'effectue facilement sur un entonnoir de Tullgren : entonnoir assez grand mais de faible ouverture, sur lequel est disposée une toile métallique à maille de 1 à 2 mm. On dispose l'échantillon choisi sur cette toile pour le dessécher progressivement au moyen d'une lampe à filament de carbone située au-dessus . Les microarthropodes, fuyant la sécheresse plus que la chaleur, descendent dans l'échantillon et finissent par tomber dans l'entonnoir et le tube de récolte . Selon que l'on désire récolter des animaux vivants ou morts, on place dans le tube de récolte, soit une simple bandelette de papier filtre imbibée d'eau, soit un liquide fixateur.

D'autres techniques par voie humide visent à une extraction plus totale de la faune mais se prêtant moins bien aux analyses de série.

Le rapport acariens sur collemboles apparaît en relation avec l'équilibre et la stabilité des biotopes . " Dans les biotopes en équilibre où la pression inter-spécifique est grande, le pourcentage des collemboles est faible; il augmente en fonction de la dégradation des biocénoses et pourrait être représentatif de l'état d'équilibre d'un milieu ". (MALDAGUE 1961).

7.2.5. Les Termites. (ordre des Isoptères)

Certains termites demeurent dans les bois secs, dont ils se nourrissent avec l'assistance de nombreux protozoaires intestinaux, d'autres ne peuvent attaquer que les bois humides des racines ou les vieilles souches déjà colonisées par les bactéries et les champignons. Les termites qui nidifient dans le sol, édifient des nids extrêmement variés: nids souterrains, nids en plaquage, nids en champignon à un ou plusieurs chapeaux, nids en colonnes, nids à parois abruptes, etc. Les termites dits termites champi-

gnonistes (Bellicositermes, Macrotermes) possèdent dans leurs nids des chambres à débris végétaux ou à pulpe de bois, imbibés de sève, et déposés en meules . Sur ces meules se développe un mycélium de champignon qui attaquant la lignine démasque la cellulose, elle-même attaquée ensuite par les bactéries cellulolytiques de l'intestin postérieur des termites ouvriers .

Les termites sont très susceptibles à la dessiccation. Ils maintiennent l'humidité de leurs habitats en utilisant l'eau de leurs aliments ou, dans les zones sahéliennes, en descendant chercher l'eau en profondeur .

Les termites réclament aussi une température relativement constante et élevée et, en plus d'une végétation suffisante à leurs besoins, doivent encore pouvoir disposer de matériaux fins de type argileux pour l'édification d'une grande partie de leurs termitières .

Dans la forêt équatoriale dominent les termites carton-niers élevant des nids arboricoles ou semi-arboricoles et les termites souterrains des litières. Dans les savanes boisées dominent les grandes termitières en forme de dôme ou de champignon à un ou plusieurs chapeaux .

La densité des termites souterrains est difficile à estimer, mais l'on peut dire qu'ils sont partout présents dans les zones intertropicales. En forêt comme en savane, les termites détruisent les litières végétales, contrecarrant les processus d'humification et même pour certaines espèces contribuant à détruire les substances humiques déjà formées. Pour cette raison, la jachère, le mulching et le brûlis contrôlé ne peuvent améliorer le sol, comme ces pratiques le font dans les pays tempérés, d'autant plus que dans les régions équatoriales, l'activité bactérienne travaille en faveur d'une destruction des acides humiques et d'une accumulation relative des acides fulviques .

Les termites influencent la morphologie, la physique, la chimie et la fertilité des sols. Les matériaux qui constituent les grosses termitières épigées sont remontés des horizons profonds du sol, seuls les termites construisent de petites termitières plus ou moins superficielles utilisant généralement des matériaux de surface. Quand une termitière meurt, elle s'affaisse

lentement, ses galeries se combler, puis l'érosion toujours active entre les termitières en étale les matériaux. Des arbustes tendent à s'implanter à la périphérie plus humide du dôme de terre, dernier vestige de l'ancienne termitière. Souvent dans les savanes, une remontée constante des éléments fins a fini par recouvrir les éléments cuirassés ou les gravillons, vestiges d'anciens sols ferrallitiques aujourd'hui disparus .

D'une manière générale, les termites poussent très loin la dégradation des matières organiques, et les teneurs en carbone et en azote sont généralement plus faibles dans les termitières que dans les sols voisins. Le rapport C/N y est aussi plus faible. Les bases échangeables s'y trouvent généralement accrues avec un rapport C/N habituellement supérieur .

Dans les grandes termitières ont été parfois trouvées des nodules calcaires ou des accumulations de sels solubles (carbonates et parfois nitrates).

Les termites, par leurs remontées d'éléments minéraux de la zone d'altération de la roche-mère, accroissent les réserves minérales des sols, et indirectement par la suite, la somme des bases échangeables. Le pH est généralement peu modifié ou rapproché de la neutralité. Les sols travaillés par les termites sont d'une manière générale, chimiquement plus riches mais moins organiques que les autres sols. Leurs qualités physiques sont aussi souvent moins bonnes. Avant d'araser les termitières, il est bon de savoir si la culture envisagée est exigeante en matières organiques ou en éléments minéraux. Le mode de mise en valeur le plus approprié pour un champ à grosses termitières épigées ne peut souvent être décidé qu'après une étude pédobiologique .

7.2.6. Les autres insectes .

En dehors des Collemboles et des termites, ce sont les fourmis et les larves de Coléoptères ou de Diptères qui paraissent être les insectes dont l'action dans le sol s'avère la plus importante .

Les fourmis sont des espèces pionnières que l'on peut rencontrer sur les dépôts récents des rivières ou les terres dénudées. On en a décrit plus de 240 genres et plus de 6.000 espèces dont les comportements sont extrêmement divers. Ces insectes n'édifient pas des nids aussi bien ordonnés que ceux des termites et s'ils creusent abondamment la terre, ils ne l'utilisent pas, à quelques exceptions près, pour leurs constructions. Les galeries innombrables des fourmis favorisent l'apport d'air et d'eau dans les sols et les remontées d'éléments fins des horizons sous-jacents se traduisent surtout par la création d'un horizon superficiel à fine granulométrie et de nature plus minérale qu'organique. En Amérique les fourmis Atta et Acromyrmex cultivent les champignons au sein de leur nid de la même manière que certains termites d'Afrique .

De nombreuses fourmis sont nuisibles à l'agriculture ou favorisent indirectement la propagation des pucerons, mais il en est aussi qui sont utilisées dans la lutte biologique contre les insectes parasites des cultures .

De très nombreux Coléoptères demeurent dans les sols et peuvent servir d'indicateurs au pédobiologiste; certains genres à vie endogée stricte possèdent un endémisme extraordinaire (COIFFAIT, 1960). Mais c'est surtout par leurs larves que de nombreux Coléoptères manifestent leur influence dans la vie des sols. Parmi les plus communes sont à citer les larves cylindriques d'Eleterides, dites " vers fil de fer " (wireworms). Le régime alimentaire de ces larves varie selon les espèces, mais nombreuses sont celles qui peuvent nuire aux cultures, leur nourriture habituelle venant à manquer .

Les larves de Diptères forment, avec les larves de Coléoptères, la grande majorité des larves d'insectes du sol. La majorité des larves de Diptères se nourrissent de débris végétaux et de litières en manifestant de nettes préférences. Elles ont une très forte influence sur la décomposition des litières végétales, qu'elles réduisent rapidement en bouillie et peuvent mélanger activement avec le sol. Leur action est très importante, mais elle reste limitée dans le temps et dans l'espace . Les larves de Bibionides, Tipulides, Scialides et Scatopsides, apparaissent parmi les plus actives .

7.2.7. Les Groupes secondaires .

Selon leur type morphologique et biologique, les Myriapo-des sont plus ou moins bien adaptés à l'excès d'eau ou au contraire à la sécheresse et reflètent généralement le régime hydrique des sols où ils demeurent. De nombreux diplopodes (iulles, glomériss) sont aussi étroitement liés au calcium.

Pour une région donnée, et compte-tenu de la végétation, il est possible de retrouver des espèces ou des associations caractéristiques des différents sols. Ces associations sont intéressantes à suivre quand la végétation locale vient à être modifiée, comme c'est le cas avec le recul de la forêt africaine.

Bien d'autres animaux existent encore dans les sols, mais leur importance dans la pédogénèse et la dynamique de ces derniers demeure assez limitée ou ne se manifeste que dans certains cas très particuliers .

On peut aussi éventuellement rencontrer en quantité dans certains sols des mollusques (escargots et limaces), des crustacés (cloportes et crabes terrestres des pays chauds), des insectivores (taupes), des rongeurs (rats et lapins) et même des édentés (tatous d'Amérique et cryctéropodes d'Afrique. L'action sur les sols de ces divers animaux peut être localement très importante .

BIBLIOGRAPHIE DE LA 3ème PARTIE

(Chapitres 4, 5, 6, et 7)

- BACHELIER (G.) - La vie animale dans les sols, Init.Doc.Tech. ORSTOM n°3, Paris, 280 p.
- BASTISSE (N.) - 1947.- Contribution à la détermination du type minéralogique des argiles des sédiments. Ann. Agron. 3, 398-454.
- BAVER (L.D.) - 1956.- Soil Physics. J. Wiley and sons. New-York, 489 p.
- BEAR (F.) - 1964.- The chemistry of the soil. Rheinhold, New-York, 515 p.
- CAILLERE (S.), HENIN (S.) - 1963.- Minéralogie des argiles. Masson, Paris, 356 p.
- COIFFAIT (H.) - 1960 - Les Coléoptères du sol. Act.Sci.Ind., n° 1260, Hermann éd., Paris, 204 p.
- DEB (B.C.) - 1950.- The estimation of free iron oxides in soils and clays and their removal. J.Soil.Sci. 1,2, 212-220.
- DEMOLON (A.), LEROUX (D.) - 1952.- Guide pour l'étude expérimentale du sol. Gauthier-Villars, Paris.
- DUCHAUFOR (Ph.) - 1965 - Précis de pédologie. 2ème Ed. Masson Paris. 482 p.
- GRASSE (P.P.) - 1950 - Termites et sols tropicaux. Rev. Int. Bot. Appl. 337-338, 549-554.
- HARDY (F.) - 1964 .- Studies on tropical soils. Identification by absorption of alizarin. J.Agric.Sci.21, 739-761.
- HENIN (S.) - 1960 - Le profil cultural. S.E.I.A. Paris. 320 p.
- JACKSON (M.L.) - 1958.- Soil Chemical analysis. Prentice Hall. U.S.A., 498 p.
- MAIGNIEN (R.) - 1962 - Caractérisation des profils des sols. Bull. Bibliogr. Pédol., XI, 2, 5 - 17.
- MAIGNIEN (R.) - 1967 - Manuel de prospection pédologique - 2 vol. 198 p., Ronéo. Centre ORSTOM Yaoundé .
- MALDAGUE (M.) - 1961 - Relations entre le couvert végétal et la microfaune. Leur importance dans la conservation biologique des sols tropicaux. Publ. Inst. nat. agron. Congo, Série Sci., N° 90, 122 p.
- POCHON (J.) - 1954.- Manuel technique d'analyse microbiologique. Masson, Paris, 124 p.
- POCHON (J.), TARDIEUX (P.) - 1962.- Techniques d'analyse en microbiologie du sol. Coll. Techn. de base. Ed. de la Tourelle St Mandé .

- QUASTEL (J.H.) - 1955 - Soil metabolism. Proc. Roy. Soc., Série B, Vol. 143, n° 911, 159 - 178.
- RUELLAN (A.), DELETANG (J.) - 1967.- Les phénomènes d'échange des cations et des anions dans les sols. Init. Doc. Tech. ORSTOM n° 5, Paris, 123 p.
- RUSSEL (M.B.) - 1959;- Water and its relation to soil and crops. Academic press, New-York, 181 p.
- TAMM (O.) - 1934.- En Snabbmethod for mineralogist jodarts granskningk. Svenska skogs.tiddser. I. III, 231-250.
- TRUOG (E.) , et al. - 1936 - A procedure for special type of mechanical and mineralogical analysis. Proc. Soil. Sci. Soc. Amer. 1, 101.
- U.S.D.A. - 1951 - Soil survey manual. The handbook n° 18, Washington D.C., 503 p.

Quatrième Partie

LES RELATIONS ENTRE LES SOLS ET LA VEGETATION

La recherche de relations entre les sols et la végétation est une opération fort délicate et concerne la végétation naturelle et la végétation cultivée par l'homme, pour sa subsistance.

Tout d'abord, on peut se demander s'il existe, dans la zone intertropicale et méditerranéenne des rapports concrets entre un type de peuplement végétal, des groupements végétaux, des espèces déterminées et des qualités précises du sol (granulométrie par exemple). Que peut-on dire de ces relations quand on considère la mise en valeur des sols pour l'agriculture, les activités pastorales ou forestières. Ce sera l'objet du chapitre 8 .

Le second problème concerne les sols et les végétaux cultivés. On s'efforce de déterminer dans quelle mesure les sols interviennent sur le développement de quelques plantes des zones étudiées. Dans le chapitre 9, sont passés en revue les facteurs extérieurs aux sols tels que le climat, le relief ainsi que les caractéristiques physiques des sols. La texture, la structure gouvernent de manière très précise l'économie de l'eau et sont donc très précieuses à connaître pour leur répercussion sur le développement des végétaux. Dans le chapitre 10, seront étudiées l'influence de la matière organique et de l'azote, celle des bases échangeables et de l'acide phosphorique .

CHAPITRE 8

LA VÉGÉTATION ET LES CONDITIONS EDAPHIQUES

- 8.1. Action du sol sur la végétation
 - 8.1.1. Le sol en tant que support
 - 8.1.2. Le sol en tant que pourvoyeur
 - 8.1.3. Interaction entre facteurs pédologiques, climatiques et topographiques.
- 8.2. Modalités d'adaptation de la végétation
 - 8.2.1. Adaptation ou préadaptation de l'espèce
 - 8.2.2. Adaptation du groupe
 - 8.2.3. Végétation et pédogénèse
- 8.3. Végétation naturelle et connaissance du milieu édaphique
- 8.4. Végétation et aménagements
 - 8.4.1. Végétation naturelle et aménagement agricole
 - 8.4.2. Végétation naturelle et aménagement pastoral
 - 8.4.3. Végétation naturelle et forestière
- 8.5. Conclusion .

Une étude sur les relations entre la végétation et le milieu édaphique peut se limiter au relevé des caractères de la couverture végétale apparaissant régulièrement associés à certaines propriétés de son support. Ainsi des prospecteurs, géologues ou pédologues, s'attacheront-ils à distinguer dans un paysage les éléments propres à faciliter la localisation d'un type bien défini de terrain; ainsi, par une démarche inverse, un botaniste, pour établir la distribution d'une espèce, sera-t-il amené à se référer à des données d'ordre pétrographique. Lorsque se pose le problème de l'utilisation des terres, il importe moins cependant de s'assurer de la constance d'une liaison que d'en élucider le déterminisme en cherchant comment l'installation et le développement de la plante se trouvent conditionnés par les facteurs édaphiques ou comment la plante intervient dans la formation et la différenciation du sol. Observons enfin que les relations entre la végétation et le milieu édaphique ne relèvent pas seulement d'une causalité interne à l'ensemble qu'ils constituent : en particulier, une modification des conditions climatiques peut entraîner des changements importants dans les liaisons constatées.

Après avoir brièvement rappelé le rôle du sol dans la vie de la plante et montré comment ce rôle peut se trouver conditionné par d'autres facteurs écologiques, il sera fait mention de quelques modalités d'adaptation de la végétation à un habitat qu'elle-même contribue à déterminer. On donnera ensuite des exemples de liaisons entre groupements, considérés d'un point de vue physionomique ou d'un point de vue floristique, et propriétés du milieu édaphique, en soulignant l'intérêt que présente leur étude pour la connaissance de ce dernier; on terminera par diverses remarques relatives à des problèmes d'aménagements régionaux.

8.1. - Action du sol sur la Végétation

L'action du sol sur la vie végétale ne peut être étudiée sans tenir compte de l'influence de l'environnement pétrographique, topographique ou climatologique: la prise en considération de l'ensemble des phénomènes conditionnant au niveau du sol la vie de la plante conduit à la notion de milieu édaphique. Dans ce complexe le sol joue un rôle essentiel. Il intervient à la fois

comme support et comme pourvoyeur .

1.1. Le sol en tant que support

Pour constituer un bon support, un sol doit être relativement meuble et profond : Une pierrosité excessive, une forte compacité à faible distance de la surface ne permettent pas à une végétation continue et puissante de s'implanter solidement . Il faut encore qu'il présente une bonne stabilité mécanique et structurale. Il faut enfin que, par rapport aux horizons sous-jacents, l'horizon supérieur ne soit pas trop riche, ce qui amènerait les racines à s'y développer de manière exclusive .

L'instabilité des sols lessivés sur fortes pentes, instabilité liée à la différenciation d'un horizon argileux jouant le rôle de plan de glissement entraîne la destruction périodique de la forêt dans les massifs granitiques du Viet-Nam et de Madagascar. Au cours de pluies cycloniques particulièrement abondantes, ces glissements peuvent être nombreux et spectaculaires . Les phénomènes de gonflement et de retrait consécutifs aux alternances d'humidité et de sécheresse, dans le cas des vertisols, l'absence de structure ou la fragilité des agrégats, qu'il s'agisse de sables ou d'éluvions sodiques, rendent le milieu impropre à l'implantation de beaucoup d'espèces .

Lorsque les substances utiles tendent à se concentrer à un certain niveau du profil, il est clair que les conditions les plus favorables se trouvent réalisées lorsque ce niveau se situe assez en profondeur tout en restant accessible à des systèmes racinaires normalement développés . De ce point de vue, les sols sous forêt dense en zone tropicale humide ne constituent pas généralement de bons supports, les éléments libérés par la décomposition de la litière s'accrurent en surface avec la matière organique au-dessus d'un horizon ferrallitique presque stérile. La végétation est alors sensible à certains éléments tels que sécheresse, feux, vents . Une fois la forêt défrichée, l'épuisement de cet horizon superficiel, par l'action conjuguée des cultures et de l'érosion peut être très rapide .

Aux Nouvelles-Hébrides, la richesse de la terre jointe à sa relative compacité favorise sur sols brun-rouge, connus pour leur exceptionnelle fertilité, l'extension de groupements d'espèces à enracinement superficiel résistant mal aux vents cycloniques. A l'inverse, on observe parfois de très grands arbres sur des sols d'apparence squelettique mais associés à des roches fissurées où les racines peuvent s'ancrer. C'est, dans le domaine néo-calédonien, le cas des forêts d'Araucarias des îles Loyauté, toujours situées dans des stations exposées à des vents très violents, et dans le domaine malgache, le cas des forêts sèches qui occupent les calcaires karstiques de l'Ouest .

1.2. Le sol en tant que pourvoyeur

Le sol pourvoie aux besoins de la végétation en mettant à sa disposition l'eau et les diverses substances minérales. Dans l'examen de ce rôle de pourvoyeur, deux ensembles de propriétés sont à prendre en considération; les propriétés concernant l'existence ou la constitution des réserves, celles concernant la mobilisation des réserves .

L'importance des réserves en eau dépend du volume et de la périodicité des apports, directement ou indirectement d'origine atmosphérique, et de la capacité d'absorption et de rétention du sol. Sa richesse en constituants minéraux utiles varie avec la composition des matériaux dont il est issu et avec les processus pédogénétiques, la liaison entre l'importance des réserves et la composition de la roche-mère présentant un caractère plus général dans le cas du phosphore et du potassium que dans celui du calcium, du magnésium ou des oligo-éléments. Quant aux teneurs en azote, elles dépendent dans une large mesure de la composition de la couverture végétale .

L'étude des conditions rendant possible l'utilisation par la plante des substances présentes dans le sol conduit aux notions d'assimilabilité et de capacité en eau utile . Des liaisons de différents types rendant compte de la mobilisation des réserves pendant la phase critique d'un cycle saisonnier ou consécutivement à certaines opérations culturales ont été mises en évidence (potentiel capillaire, capacité d'échange...);mais

les échanges lents et continus, conditionnant sur une longue période de temps l'évolution de la couverture végétale, sont encore mal expliqués .

Dans l'esprit de beaucoup de botanistes, les propriétés physiques des sols, en particulier leur capacité en eau utile, jouent un rôle plus important dans le développement de la végétation que leurs propriétés physico-chimiques. Ils pensent que, si la connaissance de ces derniers permet à l'agronome de mieux comprendre les comportements de groupements artificiels peu longévifs et gros consommateurs de substances minérales, elle présente peu d'intérêt dans l'étude de la distribution des groupements naturels, au moins en zone tropicale. L'attention dans la recherche écologique s'étant portée d'abord sur les facteurs climatiques, il était normal que l'on s'intéressât spécialement au rôle du sol dans l'alimentation en eau de la plante; en outre cette opinion se trouve en partie justifiée par la pauvreté chimique assez générale des sols dans les régions chaudes et humides, où la forêt bien souvent vit sur ses propres réserves minérales, et par l'importance majeure de l'économie en eau dans les régions semi-arides. Des travaux assez récents ont montré cependant que l'évolution de la flore pouvait dépendre dans une large mesure de certaines propriétés chimiques des sols, en particulier des variations des teneurs en phosphore . Il convient enfin d'observer qu'entre les propriétés physiques des sols et leurs propriétés chimiques, ou tout au moins leurs propriétés physico-chimiques, les liaisons sont parfois manifestes : dans l'étude de leur influence sur la végétation, on ne saurait ignorer l'existence de ces liaisons .

1.3. Interactions entre facteurs pédologiques, climatiques, et topographiques.

Les interactions entre différents facteurs écologiques présentent une particulière importance en ce qui concerne l'approvisionnement en eau .

Sous climat à précipitations faibles et irrégulières, les sols perméables, où des réserves d'eau peuvent se constituer en profondeur tout en demeurant accessibles aux racines, conviennent

mieux à la végétation que les sols où l'eau pénètre difficilement, ce qui entraîne des pertes par évaporation ou par ruissellement. Sous climat à précipitations abondantes, les sols sableux profonds sont plus " secs " que les sols de texture plus fine où des réserves peuvent se constituer sur toute l'épaisseur du profil. Encore, à supposer que les pluies soient irrégulièrement distribuées (climat de mousson), faut-il faire la distinction entre les sols bien structurés et les sols argileux compacts où les réserves utiles se limitant à l'horizon supérieur ne peuvent satisfaire qu'aux exigences d'une végétation saisonnière. L'engorgement de la surface créant un milieu asphyxiant gêne d'ailleurs le développement des racines et, là même où les réserves demeurent importantes toute l'année, rend difficile l'installation de la forêt hygrophile.

Ainsi, dans la partie méridionale du Viet-Nam, sous climat a été très pluvieux, à saison sèche plus ou moins accentuée, la forêt dense à strate dominante sempervirente ou semi-caducifoliée, à strate dominée sempervirente, occupe les sols ferrallitiques argileux ou sablo-argileux profonds et bien structurés; sur les sols sableux reposant à moyenne profondeur sur un horizon imperméable, on observe des forêts claires à strate supérieure sempervirente, à strate inférieure sempervirente ou caducifoliée; sur les vertisols pierreux et sur les sols à gravillons ou carapace, s'étend la forêt claire à strate supérieure caducifoliée, à strate inférieure caducifoliée ou saisonnière; enfin, dans les dépressions périodiquement inondées, on trouve sur des sols hydromorphes compacts des prairies dont la densité varie avec la durée de la période de submersion.

Lorsque le sol est peu profond, le terrain sous-jacent peut jouer un rôle important dans la constitution de la réserve. Sur certaines îles coralliennes du Pacifique, une forêt puissante, composée presque exclusivement d'essences sempervirentes, croît sur des lapiez que ne recouvre qu'une très mince épaisseur de terre. Au Viet-Nam, sur les schistes, les caractères de la végétation varient avec l'orientation des plans de schistosité par rapport à la surface topographique : s'ils sont fortement inclinés sur cette surface, c'est la forêt dense qui s'installe; s'ils lui sont parallèles, c'est la forêt claire.

Il faut tenir compte enfin du relief ou du microrelief. Sur les pentes, l'eau a tendance à ruisseler et le renouvellement des réserves est plus difficile. Dans les zones de piémont, sous climat humide, c'est plutôt l'excès d'eau qui est à craindre, la végétation étant alors plus belle quand les lits des ruisseaux sont relativement encaissés. L'influence du microrelief est également importante mais peut être difficile à déceler, en particulier lorsque des matériaux d'apport masquent les irrégularités d'une ancienne surface topographique : ainsi LEPOUTRE (1965 dans une étude sur la forêt de Mamora, au Maroc, a montré que les conditions édaphiques sont optimales pour les Pins lorsque, la pente du terrain sous-jacent étant faible, l'épaisseur des sédiments de recouvrement est voisine de 1,50 mètre; lorsque, en raison du microrelief du sous-sol, des phénomènes d'assèchement ou d'engorgement locaux se produisent en profondeur, les conditions optimales se trouvent réalisées pour des épaisseurs différentes .

Les réserves d'eau qui se constituent au pied des pentes et dans les dépressions sont généralement mal aérées; elles n'ont donc pas la même valeur que celles qui se constituent dans un sol perméable mais à forte capacité en eau utile. Certaines espèces croissant normalement sur terres bien drainées sont néanmoins capables de les utiliser. C'est le cas au Viet-Nam de Podocarpus imbricatus que l'on observe en forêt dense sempervirente sur des pentes fortement arrosées et, sous climat moins humide, dans des marais, en groupements parfois presque monospécifiques; c'est en Afrique le cas de Tarrietia utilis, espèce pélohygrophile de Côte d'Ivoire, retrouvée dans certains marais guinéens (LEMEE, 1959).

L'eau étant l'agent mobilisateur et transporteur essentiel des substances nutritives, les sols chimiquement pauvres sont plus " secs " que les sols riches en éléments assimilables. Ainsi des phénomènes dits de " flétrissement physiologique " ont pu être mis en rapport avec l'insuffisance des teneurs du sol en potassium qui joue d'ailleurs un rôle particulièrement important dans l'économie de l'eau .

Des interactions entre milieu climatique et milieu édaphique sont également intéressantes à signaler en ce qui concerne les échanges thermiques : les sols de coloration foncée s'échauf-

fent pendant le jour et émettent la nuit des radiations infrarouges, réduisant ainsi les écarts de température diurnes - nocturnes dans les basses couches de l'atmosphère; les sols dont la teneur en eau est élevée (sols argileux) s'échauffent et se refroidissent plus lentement. Enfin, le degré de résistance de beaucoup d'espèces au froid dépend des conditions de leur nutrition minérale : au Queensland, sur les terres fertiles, la forêt dense tropicale pénètre largement dans des régions où les gelées sont fréquentes (WEBB, 1963).

8.2. Modalités d'adaptation de la végétation .

L'adaptation est relative, d'une part à l'individu ou à l'espèce, il s'agira plutôt alors d'une préadaptation, d'autre part au groupe .

8.2.1. Adaptation ou Préadaptation de l'espèce

Deux individus ayant le même complexe héréditaire présenteront, s'ils croissent dans des milieux distincts, des différences de forme plus ou moins sensibles. Chez les espèces dites " polymorphes ", ces différences peuvent être très accentuées et seront justement qualifiées d'adaptatives lorsqu'elles apparaissent liées de manière constante à des changements déterminés des conditions stationnelles, bien que leur signification du point de vue physiologique ne soit pas toujours évidente. Ainsi, en Nouvelle Calédonie, Nepenthes vieillardii croissant à découvert sur sol sec et pauvre est une plante traînante, rabougrie, alors qu'en lisière de forêt, sur sol profond et frais, relativement riche, c'est une grande liane. S'agissant de caractères définissant l'espèce ou la variété et se transmettant indépendamment des actions extérieures, on ne peut parler d'adaptation: on les qualifiera de préadaptatifs dans la mesure où ils disposent la plante à mieux utiliser les ressources de certains types de milieux ou, par extension, lorsqu'ils ne se retrouvent que chez les espèces attachées normalement à des milieux de propriétés très voisines .

A une morphologie, à une anatomie particulières, répondent certaines dispositions physiologiques . Cependant dans le cas d'espèces polymorphes il restera toujours hasardeux de dé-

duire du port anormal d'une espèce, tel ou tel caractère du substrat. Pour ce qui est des différenciations inscrites dans le génotype, il est assez fréquent que l'on puisse associer une certaine morphologie à un certain type de comportement.

Concernant l'interprétation que l'on peut en donner, on se limitera, dans cet exposé sur l'influence du milieu édaphique, à l'exemple des plantes xéromorphes.

Les caractères dits " xéromorphes " sont relatifs à une modification de la morphologie foliaire se traduisant par un épaississement de la cuticule, l'enfoncement des stomates, l'enrichissement des tissus en sclérenchyme, la réduction des dimensions du limbe, le développement de la pilosité.... Il semble qu'il y ait une relation entre l'acquisition de tels caractères et celle d'une meilleure résistance à la sécheresse. Cependant, les espèces xéromorphes sont beaucoup mieux représentées dans les groupements sous climat relativement humide mais sur sols chimiquement pauvres que dans les groupements sous climat aride. En Australie, c'est sur les sables très déminéralisés, en particulier très pauvres en phosphore, dans la région de Perth, que la végétation présente le type xéromorphe le plus accentué; mais les espèces xéromorphes sont peu nombreuses dans les zones désertiques (BEADLE 1966). Au Brésil, la végétation des " cerrados " sous climat semi-humide (plus de 1000 mm de précipitation annuelles), sur sols profonds mais très pauvres, contraste par sa richesse en espèces xéromorphes avec la végétation des " caatingas ", localisées dans des régions beaucoup plus sèches, où dominent des plantes succulentes ou à feuilles décidues (FERRI, 1959). En Nouvelle Calédonie, le " maquis " sur roches ultrabasiques, recevant chaque année plus de 2 mètres d'eau, les périodes de sécheresse étant rarement très longues, est constitué d'arbrisseaux sclérophylles dont les formes très spéciales semblent liées à une préadaptation à des sols presque entièrement dépourvus de tous les éléments majeurs indispensables ou renfermant des minéraux toxiques. La xéromorphie dans ces conditions pourrait être la conséquence d'une adaptation progressive, intégrée maintenant au génotype, à l'oligotrophie : la proportion élevée de tissus scléreux dans le parenchyme foliaire serait en relation avec une alimentation carencée

en phosphore et en azote. Il est vraisemblable que la structure xéromorphe accroît la résistance à des sécheresses occasionnelles; mais elle ralentit les échanges avec l'atmosphère, alors que, dans les régions où les précipitations sont rares et très groupées, il importe que ces échanges présentent une forte intensité au cours des périodes les plus favorables (FERRI , 1959).

Il est assez fréquent que la majorité des espèces se rattachant à un certain genre ou à une certaine famille présentent du point de vue écologique des comportements voisins. Il s'agit alors soit de caractères préadaptatifs qui se seraient différenciés à une époque très reculée, soit de caractères apparus consécutive-ment à des regroupements dans des stations-refuges . Mentionnons à côté des Salsolacées halophiles, des Rhizophoracées colonisa-trices des vases salifères, des Aristida, répandues sur les ter-res pauvres dans toutes les régions tropicales, qui constituent des exemples classiques, les Myrtacées sclérocarpées et les Pro-téacées si nombreuses dans les scrubs australiens, les Epacrida-cées et les Cunoniacées (Codia, Pancheria) des maquis néo-calé-doniens

8.2.2. Adaptation du groupe.

L'étude des faits d'adaptation mène à considérer tout groupement végétal comme une communauté d'espèces dont l'associa-tion rend possible l'exploitation des ressources du milieu dans des conditions optimales. Sans doute, en dehors de cas évidents de parasitisme ou de symbiose, n'existe-t-il pas entre les indi-vidus qui composent le groupement de liens véritables, chacun exploitant le milieu pour son propre compte, tout en profitant des modifications des conditions écologiques résultant de la présence des autres; mais la structure de l'ensemble, condition-née davantage par les facteurs écologiques que par la flore, peut être considérée comme fonctionnelle (I). Aussi, dans les régions tropicales où les espèces ayant des exigences écologiques très voisines sont parfois nombreuses sur un terrain de faible étendue,

(I) Les groupements qui, étant associés à des milieux de même type, tout en ayant des flores distinctes, présentent des struc-tures très voisines, constituent des homécies .

les groupements caractéristiques d'un milieu donné sont-ils souvent plus faciles à définir par référence à des critères physiologiques, on parlera alors de formations, que par référence à des critères floristiques, bien que, en dernière analyse, ceux-là apparaissent les plus sûrs .

Ce qui a été dit des espèces rend compte, dans une large mesure, de l'influence possible des facteurs édaphiques sur la distribution des grands types de groupements. La forêt dense occupe généralement des sols profonds, à bonne capacité en eau utile, les groupements sempervirents s'adaptant mieux que les groupements caducifoliés aux terres très perméables à faible capacité d'échange de base; sur les sols les plus pauvres, dans les régions très humides, on observe des formations moins puissantes, à feuilles semi-coriaces (" heath forest " des auteurs anglo-saxons). La forêt claire croît sur des sols à propriétés physiques peu favorables, souvent à forte pierrosité. Les communautés herbacées se développent mieux sur des sols à horizon supérieur très uniforme; elles s'installent plutôt que la forêt sur les terres se ressuyant mal ou soumises à des inondations périodiques, là surtout où le limonage est abondant (sols " azonaux " et sols " intrazonaux "). Sur les terres bien drainées, la prairie est souvent l'indice d'un appauvrissement extrême du milieu (prairies à Aristida ou à Kerriochloa sur les plateaux ferrallitiques du Sud-Viet-Nam .) Quelques remarques complémentaires concernant les relations entre la richesse floristique et les conditions édaphiques, notamment dans le cas de milieu défavorables serviront à illustrer cette adaptation du groupe .

L'enrichissement de la flore est un fait à la fois d'ordre préadaptatif et d'ordre dynamique : diversité des conditions écologiques, milieu satisfaisant aux exigences moyennes de beaucoup d'espèces ou affaiblissant leur pouvoir compétitif sans entraîner leur disparition ... lui sont également favorables . Ainsi, la richesse floristique de certaines forêts claires indochinoises s'explique par l'hétérogénéité et les mauvaises qualités (pierrosité, microrelief) des sols auxquels elles sont associés .

L'affaiblissement du pouvoir compétitif peut résulter de l'insuffisance des ressources du milieu édaphique en substances utiles ; la flore des scrubs australiens sur terre substériles est particulièrement riche, des apports de phosphates entraînant l'apparition d'une flore banale et pauvre . La présence dans le sol d'éléments toxiques amène la différenciation d'une flore originale s'accompagnant généralement de la réduction du nombre des espèces (flores halophiles, flores métallophiles du Katanga). Les maquis néo-calédoniens, sur sols formés à partir de roches ultrabasiques ayant des teneurs élevées en chrome et en nickel, ont néanmoins une flore riche, les terres qu'ils occupent étant mieux caractérisées en surface par leur extrême pauvreté que par leur toxicité et le relief souvent très accentué entraînant une forte diversification des conditions écologiques .

Dans le cas des forêts denses tropicales, où la compétition entre individus est particulièrement sévère au sein d'un milieu d'apparence souvent très homogène, la richesse de la flore peut être mise en relation avec l'existence de nombreuses espèces ayant des exigences écologiques similaires et avec les conditions de développement difficiles des semis en même temps que leur isolement relatif (densité de la structure du couvert, diaspores lourdes restant groupées au pied de la plante-mère). En outre, les apports de matière organique provenant des différentes espèces constitutives des strates dominantes accentuent la microhétérogénéité de l'horizon supérieur du sol .

8.2.3. - Végétation et Pédogénèse.

Les relations entre la végétation et le sol ont été étudiées en se plaçant successivement au point de vue du pédologue et au point de vue du botaniste. Il faut examiner maintenant, dans le cadre du véritable complexe qu'ils constituent, l'influence du monde végétal sur l'évolution des sols et les conséquences qu'elle peut avoir en retour sur la vie de la plante .

Les systèmes racinaires et, surtout, la matière organique issue des litières interviennent très activement dans les phénomènes de décomposition et de transport qui sont à la base de la

formation des sols; en outre, la couverture végétale en réduisant l'érosion superficielle rend possible l'accumulation sur place des produits d'altération et, par voie de conséquence, la différenciation des horizons .

Le rôle de la végétation dans la pédogénèse apparaît donc au début essentiellement constructif; mais, sur une longue période de temps, il ne présente pas que des aspects positifs. En effet, l'approfondissement continu du profil, s'accompagnant généralement d'un appauvrissement chimique en milieu équatorial ou tropical humide, et la différenciation de plus en plus accentuée des horizons, entraînent l'isolement des couches supérieures du sol, les seules qui soient accessibles aux racines, par rapport à la roche mère, source première des substances minérales indispensables. Au terme de l'évolution, on trouve en surface une couche de terre riche en matière organique et en éléments assimilables mais dépourvue de réserves, constituant avec la couverture végétale une sorte de complexe symbiotique et reposant sur des horizons morts où très peu de racines pénètrent .

Ainsi, dans les régions tropicales, le sol, dont la fertilité peut paraître grande sous forêt, se révèle souvent très pauvre une fois défriché, à moins que des précautions exceptionnelles aient été prises pour éviter la destruction de l'horizon organique où se trouvent concentrées toutes les ressources minérales sous des formes facilement entraîna- bles par les eaux d'infiltration. On conçoit que l'appauvrissement dû au lessivage, si lent soit-il sous végétation climatique, rende finalement le milieu impropre à l'existence de la forêt dont divers cataclysmes (cyclones) ou l'intervention de l'homme pourront hâter la disparition (I).

L'importance et la nature du rôle de la végétation sont fonction de la masse totale et de la qualité de la matière organique s'incorporant chaque année au sol, qui, elles-mêmes, dépendent des conditions climatiques et pétrographiques; elle ne peut donc être tenue pour seule responsable de l'évolution de la fertilité : dans les secteurs montagneux du Sud Viet-Nam, la forêt de feuillus domine sur les roches neutres ou basiques, la forêt (I) Les apports de l'atmosphère qui ne sont jamais entièrement négligeables (poussières) peuvent, à la limite, compenser certaines de ces pertes et on peut admettre que des groupements associés à des sols particulièrement appauvris vivent en quelque sorte de l'air du temps. Dans de tels groupements, on trouvera beaucoup d'espèces à mycorrhizes utilisant directement l'azote atmosphérique (Casuarina).

de Gymnospermes, qui donne un humus plus acidifiant, sur les granites dont la composition et la texture facilitent l'instauration de processus de lixivation (1). Ajoutons que l'intervention de l'homme favorise souvent l'extension d'espèces susceptibles d'avoir sur l'évolution de la fertilité une action propre nuisible (extension de la Pinède au Viet-Nam, de la savane à Melaleuca en Nouvelle Calédonie).

L'influence de la végétation sur la pédogénèse est telle que, à supposer qu'un changement de climat ait entraîné une modification de la couverture climacique, le profil porte la marque de chacune des formations qui se sont succédées au même emplacement. L'étude du sol permet alors de reconstituer l'histoire de la végétation . Ainsi, en Côte d'Ivoire, l'existence dans la zone forestière de sols peu ferrallitisés, au Sud du pays Baoulé, confirme l'hypothèse d'une extension de la savane jusqu'à la zone littorale au cours de la dernière période sèche du Quaternaire . (MANGENOT, LENEUF 1959).

8.3. - Végétation naturelle et connaissance du milieu édaphique.

La végétation, en raison de ses liens étroits avec le milieu édaphique, constitue une source d'informations précieuse sur les sols et sur leur productivité, ainsi que sur les conditions pétrographiques et hydrologiques qui ont présidé à leur genèse .

L'utilisation de la photographie aérienne, qui prend de plus en plus d'importance dans l'établissement des cartes géologiques, géomorphologiques ou pédologiques, est basée sur l'examen du tapis végétal qui reflète dans ses différents aspects les variations de son support. En principe, à tout changement de végétation, s'agissant au moins du couvert naturel, correspond une modification du terrain, le tracé des lignes de contact, souvent difficiles à localiser par elles-mêmes, se trouvant ainsi grandement simplifié .

(1) Dans les secteurs les plus élevés du Massif Sud-Annamitique, le Pin à 5 feuilles, essence de pleine lumière, se régénère grâce aux trouées opérées dans la forêt par les glissements de terrain qui sont plus fréquents sur les Granites que sur les Dacites, roches neutres microlitiques .

L'étude de la couverture végétale en tant que témoin des conditions édaphiques facilite non seulement la délimitation mais aussi la reconnaissance des principaux types de sols et peut aider à préciser certains de leurs caractères; encore convient-il d'être alors très prudent.

Les informations que l'on peut tirer de l'examen de la couverture végétale concernant le substrat pétrographique seront plus complètes dans les pays au relief accentué et sous climat moyennement humide .

Au Nord de la Nouvelle Calédonie, les affleurements de serpentine, souvent de très faible extension, au sein des schistes gréseux, se reconnaissent de loin à la présence de Casuarina collina d'un vert sombre; sur les péridotites, on observe des formations buissonnantes assez continues ou " maquis " et des peuplements d'Araucaria; sur les phénites et sur certains schistes très siliceux, on trouve également des maquis, de flore toutefois beaucoup moins riche, sur schistes relativement argileux des groupements à Melaleuca; sur les basaltes - dolérites, on voit des prairies graminéennes denses; les calcaires sont en général fortement boisés. Des affleurements de roches particulières (schistes de Tondo) mais difficiles à distinguer des terrains avoisinants ont même été reconnus en raison de la physionomie spéciale des groupements qui y sont associés . A Madagascar, sur les hauts-plateaux, les affleurements de cipolins, qui sont très localisés, se reconnaissent de loin à la présence d'un grand Aloe (A. capitata, var. cipolinicola) qui domine les graminées .

En matière d'Hydrologie, des renseignements intéressants peuvent également être obtenus de l'étude de la végétation .

Au Viet-Nam, les surfaces soumises périodiquement à des inondations de forte amplitude s'accompagnant d'un limonage important sont occupées généralement par des groupements graminéens denses, de flore très pauvre, variable avec la durée de la période de submersion et avec la granulométrie des alluvions. Là où la mobilité des eaux et les variations de leur niveau sont assez faibles, on trouve des prairies de flore plus riche. Là où, sans qu'il y ait d'apports solides importants, l'engorgement du sol est entretenu en permanence par l'affleurement d'une nappe phréatique, on

observe des groupements ligneux de composition très particulière. Quand le niveau aquifère, tout en demeurant en période sèche accessible aux racines, se situe à une profondeur suffisante pour que les horizons supérieurs ne deviennent pas asphyxiants, l'influence favorable que sa présence exerce sur la végétation s'explique aisément; mais cette influence peut apparaître également bénéfique alors que la nappe se trouve bien au dessous de la zone de pénétration des racines : sur les plateaux basaltiques du Sud Viet-Nam, elle demeure sensible lorsque le plan d'eau phréatique s'abaisse à plus de vingt-cinq mètres de la surface topographique.

Parfois des différences minimes de hauteur de la nappe phréatique entraînent des changements de végétation. Ainsi à Madagascar, des sols engorgés de façon permanente jusqu'à la surface portent une prairie marécageuse à Leersia hexandra. Un décrochement topographique permettant aux dix premiers centimètres de se ressuyer permettra l'installation d'une prairie à Cynodon dactylon ou Digitaria Humberti ou encore de Brachiaria correcta.

Pour ce qui est du rôle joué par la granulométrie, dans les alluvions, on peut encore citer deux exemples malgaches . Dans le delta du Mangoky, les bras morts du fleuve comblés par des sables grossiers, se signalent par une végétation xérophile épineuse où domine Didierea madagascariensis, tandis que les alluvions limoneuses portent une forêt semi décidue complexe où le Didierea est totalement absent. Dans les régions marécageuses (pourtour du Lac Alaotra, par exemple) les sols hydromorphes organiques tourbeux se développent sous une végétation de grands cyperus (c. papyrus, ou c. madagascariensis ou C. latifolius) . Si, dans ces groupements très homogènes sur de grandes surfaces, on voit apparaître des îlots de Phragmites mauritianus, ils signalent des atterrissements d'alluvions arenacées .

La végétation devrait constituer une meilleure source d'information sur les sols, auxquels elle est directement attachée, ainsi que sur leur substrat . Si, cependant, la plupart des pédologues reconnaissent l'intérêt de l'examen de la couverture végétale pour des études de caractère local, beaucoup estiment que les relations entre les divers groupements et les principaux

types de sols sont trop lâches pour qu'il soit utile d'en tenir compte dans des travaux nécessitant des comparaisons entre stations éloignées. Il est vrai que les interférences entre facteurs climatiques et facteurs pédologiques, dans certains cas le changent du fonds floristique, rendent délicates de telles comparaisons. En outre, les pédologues tendent de plus en plus dans leurs classifications à considérer le sol indépendamment de son environnement, alors que les relations de la végétation avec le milieu édaphique ne sont pas limitées au cadre du sol, sensu stricto. Enfin, il faut reconnaître que, dans les régions tropicales, les définitions données des groupements végétaux, tant du point de vue physionomique que du point de vue floristique, sont souvent trop vagues ou trop compliquées pour qu'il soit commode de s'y référer.

La relation entre la présence de groupements buissonnants sclérophylles et la pauvreté chimique du sol, la localisation des formations graminéennes sur terres mal drainées ou soumises à des inondations de longue durée.... ont été précédemment signalées. Dans le cadre d'un fonds floristique déterminé, c'est l'espèce ou le groupe d'espèces, qualifié à ce titre de " groupe écologique ", plutôt que le groupement considéré du point de vue physionomique ou physiologique, qui constitueront des indicateurs valables.

Les espèces ou groupes d'espèces témoins peuvent se trouver associés à des milieux variés mais ayant en commun une propriété bien définie. Plus souvent, leur présence traduit la réalisation d'un état complexe résultant des interventions de différents facteurs, susceptibles dans des limites assez larges de se compenser les uns les autres. Dans ce dernier cas, les informations apportées seront plus délicates à interpréter du point de vue pédologique mais faciliteront l'établissement de cartes d'utilisation des terres.

En règle générale, la fidélité des plantes indicatrices est d'autant plus grande que leur spécialisation est plus étroite. C'est dans les limites d'un domaine où les conditions climatiques varient peu que cette fidélité doit d'abord être appréciée; on tiendra compte, en outre, de l'interférence possible des facteurs

biotiques, la distribution des espèces dépendant des variations de l'intensité de la concurrence vitale qui ne sont pas nécessairement parallèles à celles des propriétés sur lesquelles se porte l'attention .

La distinction entre plantes indicatrices d'une propriété pouvant être considérée isolément et plantes indicatrices d'un état résultant de la convergence d'actions multiples est subordonnée aux moyens d'investigation dont dispose l'observateur; elle ne saurait donc être absolue . Encore, ignore-t-on souvent si la distribution particulière de telle espèce est liée à des exigences qui lui sont propres ou le fait d'une simple tolérance; elle peut d'ailleurs résulter de la conjonction d'une exigence très précise et d'une tolérance très large vis à vis de certains facteurs, sans qu'il soit aisé de faire la part de l'une et de l'autre. Ainsi, les genres Rhizophora et Avicennia caractérisent la mangrove, formation normalement associée aux vases salifères instables des deltas largement pénétrés par les eaux marines; mais ils sont représentés sur les berges de l'Amazone dans des secteurs où les eaux sont entièrement douces et il arrive qu'en Nouvelle-Calédonie on les trouve sur des récifs coralliens frangeants .

Au groupe des plantes indicatrices d'une propriété limitée à un élément particulier du milieu édaphique se rattachent les espèces halophiles, plus ou moins étroitement spécialisées (adaptation à différents degrés de salure, à des sols de texture plus ou moins argileuses...) et les espèces normalement associées aux milieux riches en minéraux toxiques (métallophiles et eumétallophytes de DUVIGNEAUD, 1959). A ce groupe se rattachent également des espèces que, cependant, du fait qu'on les observe dans des milieux très divers, on serait tenté de qualifier d'ubiquistes, leur présence étant significative de l'intervention sur l'ensemble d'un domaine aux aspects variés d'un certain facteur climatique ou pétrographique. C'est le cas en Nouvelle-Calédonie de Melaleuca leucadendron.

Le Melaleuca ou " Niaouli " est une Myrtacée leptospermée qui croît normalement en arrière-mangrove, c'est à dire sur des sols humides, compacts, plus ou moins salés, où ses dimensions sont celles d'un assez grand arbre. Dans le cadre néocalédonien, le Niaouli ne se cantonne pas cependant dans les

secteurs sublittoraux: il est commun dans les zones de piémont, quel qu'en soit le substrat pétrographique; il s'élève sur les pentes des massifs schisto-gréseux ou métamorphiques jusqu'à 800 ou 1.000 mètres, qu'elles soient ou non fortement arrosées; il s'observe, plus rarement, sur les terrains péridotitiques, colonisant les dépressions à large fond et certains replats mal drainés.... On le trouve sur des alluvions limono-argileuses, sur des sols ferrallitiques ou ferrugineux lessivés, sur des sols érodés, de faible profondeur, où il prend toutefois un aspect rabougri; mais, toujours, il est possible de déceler sous peuplement de *Niaoulis* un horizon de gley ou de pseudogley plus ou moins développé ou en voie de formation. D'après TERCINIER (1962), une liaison pourrait exister entre cet ubiquisme du Melaleuca, qui est assez particulier à la Nouvelle-Calédonie, et l'importance relativement grande de l'ion sodium, agent de dispersion bien connu, dans le complexe échangeable de beaucoup de sols du territoire, jointe au fait que les phénomènes de lessivage, sous la dépendance des facteurs climatiques, constituent un des aspects majeurs de la pédogénèse néo-calédonienne. En outre, la matière organique, plus ou moins toxique, formée à partir de la litière de Melaleuca, plante riche en huiles essentielles est susceptible de provoquer ou d'accélérer les processus de gleyfication, l'espèce par sa seule présence induisant la formation du milieu auquel elle est préadaptée. Il convient d'ajouter que le Melaleuca est une plante anémochore colonisant rapidement les terrains découverts et pouvant, en raison de sa résistance au feu, s'y établir solidement .

D'avantage encore qu'aux plantes indicatrices au sens strict, agronomes et forestiers s'intéressent aux espèces ou groupements dont la présence témoigne de la réalisation d'un ensemble de conditions considéré du point de vue pratique comme favorable ou défavorable à la végétation artificielle de substitution .

S'agissant de l'estimation du degré de fertilité d'une terre, les groupements secondaires seront en général de meilleurs

indicateurs que les groupements clinaciques qui tendent à vivre sur leur propre fonds, s'alimentant à un courant d'échange où les éléments de réserve n'entrent que pour une faible part. La végétation clinacique renseigne sur la fertilité actuelle, souvent bien fugace; la végétation secondaire renseigne sur la fertilité actuelle, en même temps que, considérée dans ses états successifs, sur la fertilité potentielle dans les conditions naturelles; mais seule, l'étude pédologique directe des conditions édaphiques peut renseigner sur la fertilité susceptible d'être développée par l'application de techniques de culture intensive. Ces remarques peuvent être illustrées par les remarques suivantes :

Sur les plateaux basaltiques du Viet-Nam méridional, la formation clinacique normalement associée aux terres bien drainées est une forêt dense sempervirente ou semi-caducifoliée, de caractère assez uniforme, quelles que soient les ressources réelles du milieu. Sa destruction entraîne l'apparition d'une végétation cicatricielle humicole, en elle-même peu significative. Ultérieurement, à supposer que l'homme poursuive ses interventions, s'établissent des groupements graminéens dont la composition varie avec la classe de fertilité : les terres riches sont colonisées par Sorghum affine, remplacé par Imperata cylindrica sur les terres de fertilité moyenne; sur terres pauvres, Themeda arundinacea ne tarde pas à se substituer à Imperata; enfin, si l'appauvrissement du sol est extrême, la savane à Themeda fait place à la pelouse à Aristida cuningiana.

En Nouvelle-Calédonie, la plupart des plantes que l'on peut considérer comme des indicatrices valables du niveau de fertilité sont exotiques ou d'introduction relativement récente. Leucaena leucocephala s'observe sur sols chimiquement riches mais physiquement médiocres (manque de profondeur); ses exigences en potassium seraient assez élevées. Ocimum gratissimum se localise sur des sols de fertilité moyenne, bien équilibrée, Lantana canara sur des sols de fertilité moyenne pouvant présenter certaines déficiences. Miscanthus japonicus colonise sur les pentes des sols régénérés par l'érosion, néanmoins assez profonds: sa présence serait un indice plutôt favorable (alors qu'au Viet-

Nam il est associé généralement à des terres trop lessivées ou trop humides). Chrysopogon aciculatus croît sur des sols de fertilité très basse et Aristida cumingiana ne se trouve que sur des sols pratiquement incultivables Observons que beaucoup de ces plantes ne sont pas seulement des témoins mais jouent un rôle actif dans l'évolution de la fertilité : ainsi Leucaena et Lantana, sur sols de profondeur moyenne, sont nettement améliorantes .

Dans la partie Est de Madagascar domaine de la forêt sempervirente, les défrichements entraînent l'apparition de formations secondaires pauvres en espèces où, dans certains cas dominant des bambous, dans d'autres cas, une Musacée, Ravenala madagascariensis. Cette végétation, attaquée elle-même par les feux ou à nouveau abattue par l'homme, finit par céder la place à une savane à Andropogonées (Hyparrhénia rufa) qui correspond à des sols relativement encore fertiles. Ce stade est souvent très fugace. Sous l'effet des feux, de l'érosion, l'appauvrissement de l'horizon superficiel, qui contient toutes les substances utiles, est continu. La savane à Hyparrhénia cède la place à une savane à Imperata cylindrica. Au stade ultime de la dégradation, le sol est occupé par une steppe très ouverte à Aristida similis, l'érosion en nappe a totalement décapé l'horizon superficiel.

Sur les Hauts plateaux, la forêt sempervirente d'altitude est remplacée, dans ses reculs par une formation à Ericacées (Philippia). Cette formation qui est climacique en haute altitude (plus de 2.000 m) a une certaine stabilité aux altitudes plus basses, car, un peu à l'instar de Melaleuca leucadendron en Nouvelle Calédonie, elle crée un milieu défavorable aux autres plantes (vraisemblablement par la présence d'ions toxiques manganèse ou aluminium.

Cette brousse a Philippia disparaît cependant, brûlée par les feux pour laisser la place à une steppe à Aristida. Parfois la transition entre forêt et steppe à Aristida est brutale. Sur des sols ferrallitiques, très pauvres, dans des zones où la saison sèche est bien marquée, on observe seulement un

stade intermédiaire à Pteridium aquilinum (fougère aigle) qui forme souvent une ceinture étroite autour des ilots forestiers . Une couche humifère est encore présente sous le Pteridium . Elle est totalement absente ou très réduite sous les Aristida qui lui succèdent directement.

Il convient cependant d'introduire des nuances. On est accoutumé de dire qu'une steppe à Aristida correspond à des sols érodés et sans valeur. Ce qui est exact dans la majeure partie des cas. Mais il peut se faire qu'un peuplement dense et vigoureux d'Aristida recouvre un sol de valeur agricole. Il s'agit alors de sols en pente faible, profondément meubles, bien couverts par la végétation et protégés contre l'érosion. Ceci peut s'observer sur des alluvions anciennes entourant le lac Alaotra. La composition qualitative de la végétation n'est donc pas seule en cause, et du point de vue quantitatif, son aspect, sa vigueur sont aussi à envisager .

La même observation peut être faite à propos de Imperata cylindrica . Il sera maigre et clairsemé sur sols pauvres, pierreux, peu profonds ou les rhizomes se développent difficilement, par contre il indiquera de bons sols meubles quand sa pousse sera très dense et très vigoureuse .

En Tunisie sous climat méditerranéen semi-aride d'après LONG (1954), la végétation climacique est une forêt de genévriers (Juniperus phoenicea). Il a mis en évidence des séries régressives. Sur les hauts plateaux gréseux, la forêt climacique est remplacée successivement par une lande à romarin, alfa, armoise champêtre, puis par une steppe à alfa et armoise champêtre, puis par une steppe à armoise champêtre et plantain blanchâtre, enfin par une steppe très ouverte à Stipa parviflora. Dans les basses plaines, la forêt climacique a, dans les temps historiques, été défrichée et remplacée par des cultures puis ces cultures ont été abandonnées et les groupements végétaux qui se sont succédés ont été les suivants : un scrub à jujubier puis une steppe très ouverte à Stipa parviflora. Ces différentes successions correspondant à une dégradation progressive du complexe sol-végétation .

8.4. Végétation et aménagements.

La meilleure connaissance que l'étude de la végétation nous donne du milieu édaphique facilite la détermination de ce que, dans le plan d'aménagement d'une région, on appellera " la vocation des terres ". Toutefois, comme cela a déjà été souligné, la présence de tel ou tel groupement ne renseigne généralement que de manière vague sur les facteurs responsables de la situation qu'elle a permis de déceler, l'analyse pédologique constituant la seule voie d'information vraiment sûre quand il s'agit de confirmer une possibilité ou de proposer un remède .

A Madagascar, RIQUIER et BOSSER (1953-1954) ont mis au point un système de cartographie d'utilisation des terres associant les données pédologiques et botaniques. Les caractères des types de sols sont synthétisés par une fraction comme dans le système américain d'aménagement des terres; la végétation est surimposée à l'aide de signes conventionnels. Les différentes classes d'utilisation sont représentées par une couleur. Ces cartes ont été dressées dans des zones où la forêt primaire était absente, et où la végétation se compose principalement de savanes ou pseudo steppes et prairies basses marécageuses .

Il est apparu qu'une étude simultanée des sols et de la végétation était très utile à la mise en place d'un système d'aménagement des terres. La mise en valeur d'une région s'effectue d'une part, en exploitant les ressources naturelles, sans élimination de la flore existante, d'où la nécessité de connaître la végétation, et d'autre part, en substituant aux groupements indigènes des groupements exotiques. L'expérimentation agronomique dégage les données nécessaires à la bonne réussite de ces interventions .

Pour l'aménagement d'un territoire assez vaste, ces deux voies seront suivies simultanément, la première surtout par les forestiers et les éleveurs, la deuxième surtout par les agronomes, l'importance de cette dernière tendant à croître avec le perfectionnement des techniques mises en oeuvre .

Le rôle de la végétation naturelle, climacique ou secondaire, considérée dans ses rapports avec le milieu édaphique, à la fois comme source d'information et comme instrument de production, sera examiné successivement dans les cadres des trois formes classiques d'aménagement, agricole, pastoral et forestier.

8.4.1. Végétation naturelle et aménagement agricole.

Dans les régions où la culture itinérante est encore pratiquée, c'est la réapparition sur les friches d'un certain type de groupement qui renseigne le paysan sur le degré de reconstitution de la fertilité : il s'agit alors d'une fertilité actuelle répondant pour un petit nombre d'années aux exigences d'une culture ou d'une succession de cultures bien déterminées .

Il est exceptionnel que le groupement témoin soit un groupement climacique, la lenteur de la reconstitution d'un tel groupement n'étant pas seule en cause . Là où un équilibre relatif s'est instauré entre la densité du peuplement humain et le potentiel de production de l'ensemble des terres, la végétation climacique est limitée aux surfaces où toute culture est impraticable (pentes excessives, dépressions trop humides....), son extension étant souvent particulièrement réduite dans les régions pauvres et de ce fait peu peuplées. Lorsque le potentiel de production est supérieur aux besoins de la population, les formations climaciques sont en partie respectées, là même où les conditions édaphiques paraissent favorables; en effet, la fertilité développée sous leur couvert répond souvent mal aux exigences de la culture traditionnelle et, consécutivement à leur destruction, des transformations brutales, difficilement contrôlables, se produisent dans les horizons supérieurs du sol, le milieu ne se stabilisant qu'au terme de plusieurs cycles d'opérations culturales . Ajoutons que le travail nécessaire pour défricher une grosse forêt peut apparaître hors de proportion avec le bénéfice qu'on en attend .

La reconstitution de la fertilité actuelle ne progresse pas de manière uniforme. Elle est normalement plus rapide sous couverture herbacée; mais l'installation d'espèces ligneuses à enracinement profond rend seuls possibles dans certains cas

les emprunts au sous-sol nécessaires parfois à la restauration convenable de la productivité. L'expérience du paysan lui permet d'intervenir au moment le plus favorable, sa décision se fondant sur une connaissance exacte des exigences des espèces qu'il se propose de cultiver et sur des considérations de rentabilité, ainsi qu'on peut en juger par les exemples suivants :

Les populations des Hauts-Plateaux du Viet-Nam ont comme celles des deltas une alimentation à base de riz, céréale qui en culture dite " sèche " se révèle assez exigeante .

Sur les plateaux basaltiques, dans le cas des sols peu ou moyennement ferrallitisés, la terre productive sous rizière pendant 2 à 3 ans et la fertilité se régénère convenablement en 3 ou 4 ans sous groupement dense, presque monospécifique, de Eupatorium odoratum. A supposer que le paysan tarde à reprendre la culture, le groupement d'Eupatoire cède la place à une formation arbustive de transition, ou hallier. La fertilité continue cependant à augmenter, plus lentement toutefois. Les rizières établies sur défrichements de halliers de 10 à 15 ans d'âge restent productives pendant 4 ou 5 ans, le rendement en grain étant plus élevé en deuxième année qu'en première année de culture. La reconstitution de la forêt climacique, quand elle est possible, est toujours très tardive et s'accompagne, en ce qui concerne la riziculture, d'une régression de la fertilité. Dans le cas des sols plus évolués, la régénération de la fertilité sous Eupatoire se fait mal, le dynamisme de cette Composée étant d'ailleurs réduit dans ces conditions et la savane à Themeda tendant à s'établir. Le riziculteur n'obtient alors de résultats satisfaisants qu'en zone de halliers, ses techniques de défrichement devant viser à assurer la régénération de la végétation arbustive sitôt l'abandon du champ, (conservation des souches, maintien de rideaux d'arbres protecteurs). Dans le cas des sols fortement ferrallitisés, la destruction de la forêt climacique ou du hallier (il s'agit de groupements sempervirents) entraîne une régression irréversible de la fertilité, la végétation de substitution pouvant être dans un premier stade une savane à Themeda ou à Arundinella, plus ou moins longévive et faisant place sous

l'effet des feux à une pelouse à Aristida. Le paysan doit alors renoncer à la riziculture sèche et aménager des rizières de bas-fonds. La mise en valeur de telles terres sous cultures d'arbustes peu exigeants et à enracinement profond demeure néanmoins concevable (faible capacité d'échange, réserves très basses, mais propriétés physiques convenables).

Dans les régions schisto-gréseuses où prédominent les sols ferrallitiques lessivés, la culture du riz n'est possible que sur défrichements de halliers . Encore n'est-elle jamais reprise deux années de suite sur le même terrain et les rendements sont-ils inférieurs de plus du tiers à ceux obtenus sur les terres basaltiques dans les meilleures conditions. Les sols les plus évolués, sous lande à Gleichenia, sont difficilement améliorables, même par l'application d'amendements massifs, en raison de leurs mauvaises propriétés physiques .

PORTERES (1959) signale qu'en Casamance les terres lourdes que l'on trouve sous forêt sèche à Daniella oliveri ne conviennent pas à la culture de l'arachide. Après défrichement, on cultive du sorgho en travaillant le sol à la houe au maximum de manière à le rendre plus léger. Au cours des premières années, les friches intersaisonnières sont envahies par Pennisetum polystachyum; ultérieurement, l'apparition de Brachiara deflexa signifie que le milieu a été suffisamment transformé pour que la culture de l'arachide soit possible. Sans doute, le travail intense du sol a-t-il entraîné une certaine détérioration du milieu primitif; mais le profit obtenu d'un hectare d'arachide est de 5 à 8 fois supérieur à celui obtenu d'un hectare de sorgho .

A l'instar de B. deflexa, bien des espèces ou groupements spontanés témoignent de l'existence de conditions favorables à telle ou telle culture; sans être à proprement parler des indicateurs de fertilité ou de pauvreté. Au Viet-Nam, les alluvions sous savane herbeuse à Saccharum sauvages ou Sclerostachya sont propices à la culture de la canne à sucre; en Côte d'Ivoire, les terres convenant le mieux à l'Hévéaculture se trouvent en zone littorale sous les formations graminéennes; en Nouvelle-Calédonie, Leucaena leucocephala et Coffea arabica paraissent présenter des

exigences assez voisines. La notion de fertilité au sens général du terme tend d'ailleurs à être abandonnée: ce qui importe, c'est la fertilité relative à telle culture, à la mise en application de telle technique culturale .

En zone méditerranéenne, les travaux entrepris par le Professeur EMBERGER et son école ont permis d'étudier les rapports entre la végétation et les sols qui les portent, et la mise en valeur agricole de ces sols. Par exemple, LONG, en Tunisie, se guidant sur la végétation, préconise les mises en valeur suivantes:

Pour les basses plaines non salées: les sols portant l'association à Eragrostis papposa, Ziziphus latus, Artemisia campestris, conviennent à l'arboriculture : amandiers, oliviers, abricotiers, ou au paturage; les sols portant l'association à Plantago lagopus et Sibylium eburnum conviennent à la culture des céréales, mais seraient mieux utilisés sous irrigation. Les sols portant l'association à Aristida pungens et Rumex tingitanus var. lacerus peuvent être plantés en cactus, fourrage de disette .

Dans les basses plaines salées ou sebkhas les sols très salés portant une association Arthrocnemum glaucum et Halocnemum strabilaceum ne peuvent être utilisés . Par contre, où croît l'association à Salsola vermiculata var. villosa, certains arbres fruitiers peuvent pousser (figuiers, amandiers).

8.4.2. Végétation naturelle et aménagement pastoral.

En zone intertropicale, l'élevage est conduit presque partout sur le mode extensif et c'est essentiellement la végétation naturelle qui pourvoit à la subsistance des animaux.

Dans les régions humides où le climat est normalement forestier, la prairie est le plus souvent une formation de substitution entretenue par les feux. Dans les régions sèches, la physiologie des pâturages est plus proche de celle de la couverture primitive; le passage des feux ou des surcharges locales en bétail peuvent cependant modifier la flore de manière assez profonde . Ceci peut entraîner une réduction de la valeur du paturage, voire sa destruction en tant que facteur de production . C'est ce qui se passe à Madagascar, lorsque le couvert végétal se dégrade, à

partir de groupements à Hyparrhenia rufa et Heteropogon contortus, qui constituent de bons paturages, pour aboutir à des groupements clairsemés à Aristida rufescens et A. similis qui n'ont plus aucune valeur fourragère. Le rôle protecteur de ces groupements vis à vis de l'érosion est alors très insuffisant .

L'appauvrissement du sol résultant d'une mauvaise conduite de l'élevage se traduit par l'apparition d'espèces acidiphiles ou oligotrophes, s'installant plus facilement quand elles sont refusées par les animaux (certaines légumineuses) ou, sur terres argileuses, d'espèces adaptées à de mauvaises conditions de drainage en surface (Cypéracées). La productivité quantitativement et qualitativement diminue . De simples apports d'engrais minéraux, de phosphates calciques en particulier et de certains oligo-éléments (molybdène, cobalt ...), peuvent donner d'excellents résultats, soit en favorisant l'extension des espèces utiles, soit en améliorant leurs qualités fourragères, beaucoup de Graminées, tout en présentant un développement normal sur des terres relativement pauvres, ne fournissant aux animaux une alimentation convenable que lorsqu'elles croissent sur des terres chimiquement bien pourvues (cas de Stenotaphrum dimidiatum en Nouvelle-Calédonie).

L'installation de la prairie en zone forestière sur des sols très évolués, dépourvus de réserves, est peu souhaitable, surtout si la nappe phréatique se situe à grande profondeur. Sur les sols jeunes et riches, l'exploitation herbagère donnera par contre des résultats d'autant plus satisfaisants que le climat sera plus humide, c'est-à-dire le climat plus typiquement forestier (Nouvelles-Hébrides).

Sur les terres lourdes, le piétinement des animaux dégrade la structure : la prairie de fauche doit être alors préférée au pâturage .

D'une manière générale, pour la création de pâturages permanents, on recherchera les espèces à enracinement profond (I)

(I) Aux Nouvelles-Hébrides, l'introduction dans les prairies, sur terres riches mais lourdes de Axonopus compressus, espèce résistante bien au piétinement et à la dent des animaux mais à enracinement très superficiel, entraîne rapidement la formation d'un pseudogley .

et, dans les cas les moins favorables, on sera amené à envisager l'utilisation d'espèces arbustives (Leucaena).

Rappelons que la productivité des paturages tant naturels que créés ne se maintient à un niveau convenable que si un certain nombre de règles de conduite est respecté. Les paturages ne constituent qu'un stade transitoire dans l'évolution du couvert végétal, laissés à eux-mêmes on constate, dans la plupart des cas un réembroussaillement ligneux; trop souvent brûlés et surpaturés ils évoluent vers une steppe improductive. Les règles à appliquer pour les maintenir demandent à être adaptées au milieu et l'expérimentation est nécessaire. Elles consistent essentiellement en rotations des parcelles paturées, en espacement des mises à feu, à des dates que l'expérience précise, en multiplication des points d'eau, pour éviter le piétinement excessif de certaines zones, et, si la rentabilité le permet, en apports d'engrais minéraux en surface .

8.4.3. - Végétation naturelle et foresterie.

Toute politique forestière intéressant une région assez vaste s'ordonne autour de trois objectifs principaux, productivité, protection contre l'érosion et alimentation convenable des rivières, conservation de la flore et de la faune à des fins scientifiques ou touristiques, tel ou tel de ces objectifs pouvant apparaître prioritaire, suivant les conditions naturelles et suivant les impératifs économiques propres au territoire considéré .

En matière de productivité, les techniques à mettre en oeuvre se rapprochent de celles dont les agronomes préconisent l'utilisation. La rentabilité de la production forestière par unité de surface mise en valeur étant normalement plus basse que celle de la production agricole, le forestier est amené cependant à davantage tenir compte des équilibres qui se trouvent réalisés naturellement, toute transformation profonde du milieu nécessitant des aménagements coûteux.

Lorsque l'exploitation porte sur la forêt naturelle, des précautions particulières doivent être prises partout où le sol est profond, pauvre et très différencié en surface : une ouverture trop large dans le couvert entraînera une dégradation locale du milieu édaphique rendant difficile l'installation des semis

auxquels un éclairage intense d'ailleurs ne convient généralement pas; la compaction du sol par les travaux de débardage pourra nuire également à la régénération du peuplement, les risques étant accrus si le relief est accentué .

La productivité des forêts denses tropicales est faible; en outre, dans bien des pays, les conséquences d'un déboisement excessif se révèlent déjà redoutables. On est ainsi amené à effectuer des plantations d'espèces indigènes ou exotiques, les éléments à prendre en considération dans le choix du terrain et dans le choix des essences étant à la fois d'ordre écologique et d'ordre économique et humain .

On a coutume de réserver au forestier les " mauvaises terres ". Il semble que des erreurs soient parfois commises de ce fait, d'une part en raison de l'insuffisance des critères retenus dans l'appréciation de la qualité ou de la vocation d'une terre, d'autre part en raison d'une certaine méconnaissance du rôle de la forêt en matière de protection du milieu et d'hydrologie. En outre, la rentabilité d'une exploitation forestière, même sur des terres relativement riches, peut, dans un certain contexte économique et humain, se révéler nettement supérieure à celle d'une exploitation agricole ou, surtout, pastorale .

Quels que soient les caractères du milieu édaphique, il existe généralement, à supposer que le climat ne soit pas vraiment excessif, des espèces susceptibles de s'y adapter .

Dans le cas de sols très pauvres, ne pouvant satisfaire qu'aux exigences d'espèces de faible intérêt économique, seules des considérations touchant la lutte contre l'érosion ou l'hydrologie justifieront les travaux de reboisement et, souvent, des dispositions tendant simplement à assurer la sauvegarde de la végétation naturelle ou sa régénération, là où elle a beaucoup souffert , apparaîtront préférables à l'introduction d'espèces exotiques dont le comportement n'est jamais totalement prévisible. C'est surtout dans les secteurs où le relief est très accentué que l'aménagement forestier devra être plus conservateur

que transformateur. (I)

Cependant le cas spectaculaire suivant mérite d'être cité où l'introduction d'une espèce étrangère a transformé les conditions d'exploitation du milieu naturel au point de vue forestier. La plantation de divers *Eucalyptus*, s'accommodant de sols ferrallitiques pauvres sur les hauts-plateaux malgaches d'où la forêt primitive a pratiquement disparu a permis de fournir les besoins essentiels des populations locales, et par contre coup a entraîné une exploitation moindre des vestiges forestiers naturels dont l'existence a été prolongée .

Sur terrain horizontal ou en pente très douce, lorsque le sol est relativement perméable, il est plus difficile de prévenir l'érosion verticale , ou lessivage, que l'érosion de surface. La présence d'un groupement composé d'espèces à enracinement profond, pouvant tirer des horizons inférieurs les substances minérales et l'eau indispensable, freine l'épuisement chimique par les eaux d'infiltration et peut même inverser le sens des migrations . Dans ces conditions, là où il est difficile de corriger les déficiences du milieu par des apports minéraux effectués régulièrement, soit pour des raisons d'ordre économique, soit pour des raisons d'ordre pédologique (faible capacité de rétention ou pouvoir rétrogradateur trop élevé du complexe d'échange) la forêt constitue le moyen de mise en valeur le plus sûr. Dans les régions dont les ressources en eau sont limitées, il faut néanmoins prendre garde au fait que les arbres, les feuilles surtout, sont de gros consommateurs d'eau, le remplacement par la forêt d'une végétation basse à enracinement superficiel pouvant entraîner des pertes correspondant à plus de 500 mm de précipitations annuelles .

(I) Les agronomes reprochent volontiers aux forestiers d'être trop conservateurs. Ainsi, dans un territoire où la culture itinérante constitue le principal moyen d'existence de la population, la création de vastes réserves, qui en réduisant l'espace agricole oblige le paysan à réduire le temps de jachère, peut constituer une mesure dangereuse . Toute décision de mise en défense doit s'accompagner de mesures visant à améliorer par la mise en œuvre de techniques nouvelles la productivité des terres laissées à la disposition du cultivateur .

Lorsque l'épaisseur des horizons affectés par les phénomènes de lessivage est trop grande pour que les arbres puissent accéder aux réserves minérales concentrées dans les couches profondes ou lorsque le sous-sol est lui-même très pauvre, le forestier se contentera généralement de mesures conservatoires. Dans le cas où les propriétés de l'horizon supérieur seraient telles que leur fertilité puisse être maintenue à un niveau convenable par des interventions qui ne soient pas trop coûteuses, il pourrait céder la place à l'agronome .

Les sols qui, à l'inverse de ceux dont il vient d'être question, sont chimiquement riches mais présentent des propriétés physiques défavorables (forte pierrosité, compacité....) sont également à réserver aux spéculations forestières. (I). Les essences intéressantes à planter sur des sols de ce type sont toutefois peu nombreuses et, les arbres une fois en place, il faut veiller aux variations du comportement des individus avec l'âge .

Ainsi, en Haute-Cochinchine, sur sols ferrallitiques pierreux, généralement/^amauvais drainage, Tectona grandis a au début une croissance très rapide; ultérieurement, il souffre du manque de profondeur du sol et de sa tendance à l'engorgement en saison humide. Etant donné que le ralentissement de la croissance n'est pas dû à l'épuisement des réserves, on peut envisager une réduction de la périodicité des coupes, le problème étant alors celui de la commercialisation de bois de faibles dimensions .

(I) Observons cependant que les techniques de culture primitives ou, tout au moins, basées sur l'utilisation d'une main d'oeuvre nombreuse, à la différence des techniques modernes basées sur une mécanisation intensive, permettent souvent de tirer un excellent parti de tels sols.

8.5. C O N C L U S I O N -

On a voulu dans ce chapitre montrer l'intérêt présenté par la connaissance des relations entre la végétation et le milieu édaphique et de dégager quelques unes des perspectives suivant lesquelles les recherches dans ce domaine pourraient s'orienter. On n'a pas abordé l'examen des méthodes d'étude; elles peuvent varier suivant les moyens et les objectifs, sans que leur disparité traduise sur le fond une différence essentielle de conception .

Il faut cependant rappeler, en conclusion, qu'on ne saurait bien interpréter les rapports entre la végétation et les sols en se plaçant exclusivement au point de vue du pédologue ou au point de vue du botaniste, ces rapports étant conditionnés par l'ensemble des facteurs écologiques et se modifiant à la suite de changements pouvant affecter indépendamment le milieu édaphique ou la flore. Il ne faut donc pas considérer ces rapports comme définitifs et assurés, ni dans l'espace, ni même dans le temps. Ces rapports ne sont pas toujours simples ni faciles à saisir de prime abord. Pour citer un exemple. A Madagascar, dans le delta du Mangoky et en général dans une partie du Sud Ouest, le Salvadora angustifolia semble lié à des sols salés, engorgés pendant une période de l'année . Mais on trouve dans d'autres régions le même Salvadora angustifolia sur des calcaires fissurés très secs. Est-ce un arbre de station sèche pouvant tolérer le sel et un excès d'humidité, donc d'une grande plasticité ? ou, bien que morphologiquement semblable le Salvadora des zones salées est-il physiologiquement différent du Salvadora des calcaires, l'un ne pouvant remplacer l'autre ?

Il est cependant certain que, plus la connaissance des conditions du milieu est poussée, plus il est possible de comprendre les liaisons entre la végétation et les sols . On peut alors déduire de l'étude de la végétation, sachant qu'elle est le reflet de certains caractères du milieu, une utilisation préférentielle des terres . Ceci est déjà concevable par exemple en région méditerranéenne, pays de vieux peuplement, très transformé par l'homme, où les groupements végétaux sont des groupements secondaires, de structure et donc d'étude relativement simples ,

et où, de plus la flore est bien connue et l'expérimentation agronomique souvent développée .

Dans les pays de la zone intertropicale, on se heurte à de plus grandes difficultés car les lacunes dans les connaissances sont trop grandes . Le réseau des relevés climatiques et surtout microclimatiques est très lâche, les processus pédogénétiques ont besoin d'être précisés, la flore est mal connue, ce qui rend la détermination de beaucoup d'espèces aléatoire et, de ce fait, les associations végétales n'ont pu être suffisamment étudiées. Or, si on veut dégager de façon valable leurs rapports avec le milieu, il est nécessaire d'étudier leur structure de façon très précise . De plus, l'expérimentation agronomique reste souvent peu développée. Dans l'état actuel de nos connaissances il faut donc se garder d'extrapolations trop hasardeuses, et poursuivre dans le domaine de l'écologie au sens large des recherches qui seront certainement très fructueuses .

C h a p i t r e 9

ETUDE DES FACTEURS DE LA FERTILITE DES SOLS

A. LES FACTEURS EXTERIEURS; LES FACTEURS PHYSIQUES.

9.1. GENERALITES

9.2. LES FACTEURS CLIMATIQUES.

9.2.1. Action directe du climat sur les plantes

9.2.2. Action indirecte du climat sur les plantes

Site

Microrelief

9.3. FACTEURS PHYSIQUES DANS LES RELATIONS SOL/PLANTES

9.3.1. Sol réservoir d'eau

9.3.2. Circulation d'eau dans les sols

9.3.3. Structure du sol

Etude sur le terrain

Indice de structure

Structure et travail du sol

Structure et enracinement

9.4. Conclusion

9.1. GENERALITES.

Les facteurs climatiques dans leurs relations avec les plantes et le sol .

. Action directe du climat sur les plantes .

Les facteurs climatiques peuvent intervenir directement sur les plantes, en raison des caractéristiques particulières de chacune d'entre elles, longueur de leur cycle, ensoleillement et température, besoins en eau, résistance à la sécheresse ou à l'excès d'eau, etc. Sans entrer dans les détails, le pédologue peut connaître les aptitudes essentielles des principales cultures, l'adaptation réelle au climat peut être ensuite l'objet d'un travail de sélection ou d'amélioration génétique qui est un travail de spécialiste .

. Action indirecte du climat par l'intermédiaire du sol .

Les facteurs climatiques peuvent intervenir indirectement sur la végétation soit par l'intermédiaire du site, soit par l'intermédiaire du sol lui-même .

En ce qui concerne le site, le pédologue peut préciser l'influence de la topographie conditionnant le ruissellement, l'infiltration, l'érosion, le drainage général, la position des nappes, les dangers d'inondation, les possibilités de lessivage ou de remontée. Un facteur très important, le microrelief, influence surtout la répartition superficielle de l'eau .

Le sol modifie les actions climatiques, par sa profondeur dont dépend la réserve en eau ; par sa texture qui conditionne la perméabilité, la rétention d'eau, les phénomènes capillaires .

Les relations sol-plante.

L'action directe ou indirecte du climat intervient surtout sur l'alimentation en eau des plantes qui est un facteur essentiel de croissance. C'est même celui qui détermine l'aptitude culturale car c'est un élément peu modifiable; néanmoins, il est possible de pratiquer dans certains cas l'irrigation ou le drainage.

. Facteurs physiques autres que l'eau .

Parmi les autres facteurs de croissance très importants, il faut citer les propriétés physiques qui influencent le développement des racines, c'est-à-dire : l'état meuble ou compact, la pierrosité, la présence d'horizons indurés ou asphyxiants, à plus ou moins grande profondeur;

. Les propriétés chimiques .

Les propriétés^{chimiques}/du sol qui conditionnent la croissance des végétaux sont : soit les teneurs en éléments fertilisants qui agissent directement sur l'alimentation des plantes (N, P, K, Ca, Mg, S, oligo-éléments); soit certains facteurs de toxicité, tels que : excès de calcium ou de sodium, pH trop acide ou trop basique, sels solubles en excès, toxicité aluminique ou manganique, etc.

Les carences en éléments fertilisants sont considérées comme les facteurs les plus faciles à corriger; par contre, d'autres facteurs chimiques, comme l'excès de calcaire ou de sodium, sont également des facteurs peu modifiables .

Le cas de la matière organique peut être classé à part, l'humus intervient sur le métabolisme de l'azote et d'un certain nombre d'éléments fertilisants, mais est également un facteur essentiel de la structure du sol, et conditionne l'activité biologique dont dépend, pour une large part, la fertilité du sol .

Les relations plante-sol .

Sous un climat convenable, il peut être possible de définir un sol idéal convenant à de nombreuses cultures, néanmoins, les différentes plantes, en raison des variations de leur système racinaire et de leurs exigences variables du point-de-vue chimique, peuvent s'adapter différemment aux diverses propriétés des sols .

Les facteurs essentiels pouvant être l'objet d'adaptations différentes sont les suivants :

1. sol.

- besoins en air et en eau
- facteurs mécaniques de développement racinaire,
- éléments fertilisants,
- facteurs de toxicité chimique.

Il serait souhaitable de dresser pour chacune des principales cultures une liste de ces possibilités d'adaptation; ces listes existent dans certains cas précis, comme par exemple la résistance au sel .

L'action de l'homme .

L'étude de l'action de l'homme dépasse le domaine de la pédologie appliquée, et parfois même celui de l'agronomie, néanmoins, il est impossible de ne pas en tenir compte puisqu'en définitive, c'est l'homme qui réalise la mise en valeur du sol .

Dans les pays en voie de développement, il est nécessaire de tenir compte de facteurs généraux, comme la densité de population, les possibilités de migration et d'installation de villages, le niveau de technicité et les pratiques traditionnelles telles que feu de brousse, transhumance, techniques de culture traditionnelles, etc. pouvant influencer sur la dégradation du sol .

9.2. LES FACTEURS CLIMATIQUES DANS LEURS RELATIONS AVEC LE SOL ET LES PLANTES.

9.2.1. Action directe du climat sur les plantes .

Il n'est pas possible de donner ici les caractéristiques écologiques détaillées des différentes cultures, ainsi que toutes les mesures ou indices climatiques qui peuvent être utilisés pour juger de l'adaptation d'une plante à une région déterminée; il sera seulement présenté un aperçu simple des exigences climatiques essentielles pour les cultures tropicales dont l'intérêt économique est important (cf. tableaux situés pages 183 à 185 .

On indique comme caractéristique essentielle : la longueur moyenne du cycle de la plante qui permet l'adaptation au cycle des saisons, en particulier à la longueur de la période sèche.

a. Longueur de la saison sèche.

Les besoins en eau et la longueur de la période sèche sont donc des éléments essentiels de l'adaptation des cultures. Les plantes pérennes ou à cycle long nécessitent une pluviométrie bien répartie et une courte saison sèche. Les plantes à cycle court peuvent végéter durant une courte saison des pluies suivie d'une longue saison sèche .

b. Ensoleillement .

Les différentes plantes peuvent nécessiter un ensoleillement plus ou moins important. Certaines, comme le cacaoyer, sont des plantes d'ombre qui ne supportent pas l'ensoleillement direct, d'autres, comme la canne à sucre ou le riz, préfèrent un fort ensoleillement, certaines comme le café, sont intermédiaires, et certaines, comme le maïs, semblent indifférentes .

C'est ainsi que, pour la canne à sucre et le riz, on choisira les zones de savane à saisons alternées; pour le cacaoyer, les zones forestières ombragées seront préférées; le café pourra végéter en zone de forêt ou en zone limite de savane, un ombrage pourra lui être nécessaire dans les régions les plus sèches .

Les plantes originaires des pays tempérés, comme certaines plantes maraîchères (tomates, aubergines, etc), ne peuvent mûrir qu'en période sèche et ensoleillée mais pas trop chaude .

c. Pluviométrie et besoins en eau.

Les besoins en eau des plantes sont plus ou moins élevés, ils déterminent des limites de pluviométrie. Ces limites sont approximatives, elles sont fonction de la répartition des pluies et de l'évaporation, ainsi que du pouvoir de rétention du sol pour l'eau. D'autre part, des plantes peuvent s'adapter à certaines conditions extrêmes mais leur rendement économique peut se trouver compromis si la pluviométrie est insuffisante . Enfin l'irrigation d'appoint est souvent utilisée pour les plantes nécessitant à la fois un fort approvisionnement en eau et un fort ensoleillement, c'est le cas pour la canne à sucre , les bananes, le riz .

d. Température.

Il n'a pas été fait mention du facteur température, car ce facteur est généralement correct dans les pays tropicaux où la température est constante et élevée durant la période des pluies, néanmoins, des problèmes de température peuvent se poser pour certaines cultures d'arrière-saison, en irrigation .

Le riz désaisonné (novembre - décembre - janvier - février) dans l'hémisphère nord peut souffrir d'une température trop basse (10 à 14°) dans les régions sahéliennes, ce qui ralentit la croissance. Inversement, la récolte doit être terminée avant l'arrivée des fortes températures (mars), il peut se produire un échaudage ou certains accidents dus à la sécheresse (exemple : clivage du grain dans le cas du riz).

e) Le Vent.

Le vent peut être nuisible pour certaines cultures irriguées en pays sec (bananier).

f) Limites climatiques des cultures .

Certaines adaptations climatiques sont extrêmement précises. La limite sud de la culture du coton à longues fibres (type Egyptien- Barbadien) se situe vers l'isohyète 450 mm; il suffit que cette pluviométrie et l'humidité qui en résulte soient supérieures pour voir apparaître la maladie bactérienne dite " Black Arm ", une sélection rigoureuse des données résistantes à cette maladie doit être réalisée . Par contre, la limite sud de culture du coton " Allen " (courtes soies), que l'on situait autrefois vers l'isohyète 1200 mm, peut être reculée vers des régions plus humides, même en zone forestière, en raison du progrès considérable des traitements antiparasitaires .

Il faut tenir compte du fait que la plupart des plantes sont douées d'une certaine plasticité et que leurs conditions d'adaptation ne sont pas absolues mais contingentes et dépendent beaucoup de l'interaction des autres facteurs du milieu, en particulier du sol .

9.2.2. Action indirecte du climat par l'intermédiaire du sol.

Deux facteurs importants peuvent intervenir: le site et le microrelief .

a. Le Site. Les plantes puisent l'eau dans le sol par leurs racines, cette eau peut provenir de l'infiltration des pluies, plus ou moins retenues par le réservoir que constitue le sol. Elle peut provenir également d'une circulation souterraine, qu'il s'agisse d'une nappe ou seulement d'écoulements à courte distance qui se rassemblent en certains points bas .

A part certaines régions particulièrement planes, comprenant les grandes cuvettes deltaïques ou lacustres, le paysage africain est généralement constitué par une succession de plateaux plus ou moins étendus, séparés par des vallées de largeur variable, où coulent de petites rivières permanentes ou temporaires. La succession plateau, pente, thalweg, représente la forme la plus courante de relief dont les détails peuvent varier en fonction des types de climat, de roche-mère ou d'hydrographie . Les variations de relief influencent non seulement l'écoulement des eaux mais par voie de conséquence, la nature des sols, et agissent donc doublement sur la répartition des cultures .

En régions sèches .

- Les sols des zones surélevées sont souvent, soit cuirassés, soit très sableux; ils sont donc très sensibles à la sécheresse ainsi qu'à l'érosion éolienne, on ne peut donc y cultiver que des plantes très résistantes à la sécheresse du sol (mil - arachide).
- Les sols de pente (qui sont souvent assez faibles) subissent néanmoins les phénomènes d'érosion hydrique et de ruissellement. Ces sols peuvent être enrichis en sable grossier, ou en gravillons, ou présenter un horizon durci en surface. Les sols protégés contre l'érosion sont de texture moyenne, ils sont souvent très utilisés (coton - sorgho).
- Les sols de bas de pente sont généralement de texture plus fine, et sont chimiquement plus riches que les sols de plateau et de pente. Ces sols rassemblent les eaux de ruissellement et sont

plus faciles à irriguer, ils permettent la culture de plantes relativement exigeantes en eau et en éléments fertilisants (coton, sorgho, maïs, cultures maraîchères). Dans certaines régions, les sols de bas de pente sont sujets à des phénomènes d'alcalisation .

. Les sols de vallées. Les vallées sont généralement occupées, sur de vastes surfaces par des sols argileux sauf en bordure des cours d'eau présentant des bancs limoneux. La mise en valeur de ces vallées dépend des conditions d'inondation et de drainage; elle nécessite fréquemment d'importants travaux d'aménagement (rizières) .

En régions humides.

. Les sols de plateau, en régions humides, sont, lorsqu'ils ne sont pas cuirassés, fréquemment assez riches en argile et humus; ils ont une assez bonne capacité de rétention pour l'eau et sont bien drainés. Leur richesse chimique est variable en fonction de la nature de la roche-mère; lorsqu'elle est assez bonne, ce sont souvent des sols très cultivés (café, plantes vivrières diverses).

. Les sols de pente, soumis à une forte érosion, s'enrichissent d'une manière relative en éléments grossiers, graviers et gravillons. Le lessivage oblique s'ajoute au lessivage vertical. Ces sols sont souvent chimiquement pauvres et ils peuvent souffrir du manque d'eau. Bien protégés contre l'érosion, ils peuvent servir à la culture du café, du palmier, de l'hévéa, de plantes vivrières diverses. En régions montagneuses , certains sols rajeunis peuvent être argileux et de profondeur moyenne; sur roches basiques ils peuvent être très fertiles .

. Les sols de bas de pente sont enrichis par colluvionnement. De granulométrie très variable, suivant la nature de la roche-mère, ces colluvions peuvent être limoneux ou sableux. Ces sols ont l'avantage d'être meubles et profonds, et souvent assez humides avec un drainage moyen. Ils permettent la culture de plantes exigeantes en eau et nécessitent seulement un drainage moyen (cacaoyer, bananier, palmier).

. Les sols de vallées présentent les mêmes caractéristiques qu'en pays secs, ils ont souvent besoin d'être drainés mais peuvent porter de belles cultures avec engrais (exemple : culture du bananier).

b. Le microrelief.

Le microrelief qui n'apparaît pas sur les cartes topographiques, est souvent caractéristique de certaines catégories de sols (microrelief gilgaï des Vertisols). Il peut être dû à l'action des racines des arbres, mais, généralement, les dénivellations qui varient de quelques décimètres à 1 mètre sont provoquées par les mouvements internes du sol, gonflement et retrait, ou par la circulation des eaux souterraines, le travail des animaux et de l'homme . Dans les grandes plaines alluviales (cuvette tchadienne, delta central nigérien), certains types de sol ont un microrelief particulier .

Ce microrelief agit sur la fertilité en provoquant des variations importantes d'humidité du sol à courte distance: excès d'eau dans les points bas, sécheresse dans les points hauts. Certaines cultures sensibles à l'humidité, comme le coton, sont fortement influencées par le microrelief; la croissance des est en relation étroite avec plantes / les formes du microrelief . La culture du riz est également influencée par le microrelief. Pour effectuer des semis directs ou des semis sous l'eau par avion, un terrain plat de grande étendue est nécessaire; en terrain varié, le repiquage est indispensable. Pour corriger le microrelief, on pratique la technique du planage qui consiste à décaper les points hauts et à combler les points bas avec une large pelle montée sur un bâti horizontal ("Land plane ").

Ce planage peut amener en surface des horizons situés à 0,20 m ou 0,30 m de profondeur. Dans certains types de sol au profil homogène (sols bruns^{sub}/arides, vertisols) ce planage ne provoque pas d'abaissement de fertilité . Dans d'autres types de sol (sols ferrugineux tropicaux lessivés, sols ferrallitiques) un décapage dépassant 10 cm peut provoquer une quasi-stérilité du sol . D'une manière générale,

l'opération de planage doit tenir compte de l'épaisseur de l'horizon supérieur humifère .

c. Notation du Relief et du Microrelief.

D'après DURAND, on peut classer comme suit les différents types de relief (pour les besoins de l'utilisation):

Relief - buttes	1 - 1)	} drainage facile
croupes	1 - 2)	
levées alluviales		} travaux de nivellement pour l'irrigation
bourrelets de berge	1 - 3(
cuvette évasée ou large thalweg		} drainage très difficile
	2 - 1(
cuvette nette	2 - 2)	} drainage très difficile à impossible
cuvette allongée	2 - 3(
pente 1%	3 - 1)	} drainage facile
- 1 à 3%	3 - 2)	
		} aménagement nécessaire
- 3%	3 - 3)	
irrégulière	3 - 4)	} aménagement difficile
	(cile	
Microrelief 1 uni		Dans des cartes très précises, il est possible de donner en cm l'importance des dénivellations maximum 10-20-30-40-50, etc.
2 plat		
3 ondulé ou peu bosselé		
4 raviné		
5 Gilgai ou très bosselé		

d. Modelé des zones ferrallitiques. Le modelé en zone ferrallitique peut-être classé de la manière suivante :

- relief plat (1) (zones de plateau ou zones d'inondation)
- pentes faibles (1') (larges zones planes, larges bas fonds)
- collines aux pentes assez raides séparées par de larges bas-fonds (2 1)
- collines aux pentes moyennes séparées par des bas-fonds moyennement larges (2 m)
- collines aux pentes assez raides séparées par des bas-fonds étroits (2 c)
- collines aux pentes abruptes ou zones montagneuses (3)

Des notations beaucoup plus précises peuvent être données aux différents types de toposéquences .

EXIGENCES CLIMATIQUES DES PRINCIPALES CULTURES

Tableau 6 - 1

Plante	Cycle	Besoins en eau et limites de pluviométrie	Ensoleillement	Durée limite de la saison sèche	Résistance à la sécheresse dans le sol	Résistance à l'exposition d'eau dans le sol	Divers
Caféier	pérenne	besoins en eau importants $P > 1200$ à 1500 mm répartis sur 8 mois	ensoleillement moyen ombragé dans les régions les plus sèches	inférieure à 4 mois	peu élevée à moyenne suivant les variétés	très faible	zones tropicales zone forestière et soudano guinéenne
Bananier	pérenne	besoins en eau très élevés $P > 1500$ mm sur plus de 10 mois ou irrigation d'appoint	ensoleillement variable ombrage non indispensable	pas de période sèche sauf avec irrigation	nulle	moyenne à forte sup- pression de l'inondation	zone forestière ou zone tropicale et équatoriale, zones tropicales semi-humides avec irrigation
Palmier à huile	pérenne	besoins en eau très élevés $P > 1500$ mm peut descendre à 1300 dans des conditions édaphiques favorables	ensoleillement faible à moyen pas d'ombrage	inférieure à 4 mois	pouvant être moyenne en raison de l'enracinement profond	moyenne à forte suppression de l'inondation	zones tropicales humides et équatoriales zones forestières ou soudano-guinéennes.

EXIGENCES CLIMATIQUES DES PRINCIPALES CULTURES

Tableau 6-2

Plante	Cycle	Besoins en eau et limites de pluviométrie	Ensoleillement	Durée limite de la saison sèche	Résistance à la sécheresse dans le sol	Résistance à l'excès d'eau dans le sol	Divers
Hévéa	pérenne	P > 1600mm	ensoleillement variable	inférieure à 5 mois	moyenne enracinement profond	peu élevée	zones tropicales humides et équatoriales
Cocotier	pérenne	P > 1600 mm parfois inférieur	ensoleillement variable	inférieure à 3 mois	faible	faible sauf en eau salée	zones tropicales humides et équatoriales des régions côtières
Canne à sucre	cycle long 18 mois	besoins en eau élevés pluviométrie variable	ensoleillement assez important	pouvant dépasser 5 mois avec irrigation	moyenne à faible	moyenne	zone tropicale semi-humide à saisons alternées préférables zone soudano guinéenne
Manioc	Cycle long 15 à 18 mois	P > 1100mm peut végéter jusqu'à 800 mm mais avec des rendements moindres	ensoleillement moyen à faible	4 à 5 mois de saison sèche	assez élevée	très faible	zones tropicales semi humides et zones tropicales humides soudano guinéennes et forestières

EXIGENCES CLIMATIQUES DES PRINCIPALES CULTURES

Tableau 6-3

Plante	Cycle	Besoins en eau et limites de pluviométrie	Ensoleillement	Durée limite de la saison sèche	Résistance à la sécheresse dans le sol	Résistance à l'excès d'eau dans le sol	Divers
Igname	10 à 12 mois	P > 1000 mm	Ensoleillement moyen	4 à 5 mois de saison sèche	moyenne	moyenne	zones tropicales humides soudano-guinéennes limite forestière
Maïs	3 mois	Importants P > 800 mm ou irrigation ou dé crue	variable	8 mois	faible	assez élevée	zones tropicales humides ou zones sèches avec irrigation
Coton	4 à 5 mois	P > 600 mm < 1.200 mm ou irrigation d'appoint	important	6 à 8 mois suivant possibilités d'irrigation et variétés	assez bonne	très faible	zone soudano guinéenne ou soudanienne ou sahélienne avec irrigation
Sorgho	4 mois	P 500 à 1100 mm	important	6 à 9 mois	bonne	moyenne	zones sahélienne soudanienne soudano guinéenne
Mil	3 à 4 mois	P 400 à 800 mm	important	8 à 9 mois	très bonne	moyenne	zone sahélienne et soudanienne
Arachide	3 à 4 mois	P 500 à 1200 mm	important	6 à 9 mois	moyenne	faible	zone soudanienne soudano-guinéenne

9.3. LES FACTEURS PHYSIQUES DANS LES RELATIONS SOL-PLANTE.

9.3.1. Le sol réservoir d'eau pour les plantes .

Le sol peut être considéré en tant que réservoir d'eau pour les plantes. L'importance de ce réservoir dépend de la possibilité d'emmagasiner de l'eau (facilité et profondeur d'infiltration) et du pouvoir de rétention pour l'eau. La profondeur est celle de la couche perméable située au-dessus d'un horizon durci ou imperméable. La facilité d'infiltration dépend de la pente (ruissellement) et de la perméabilité intrinsèque du sol. La rétention dépend des propriétés capillaires du sol ou d'une absence d'écoulement en profondeur. En dehors de l'alimentation par les pluies, il faut tenir compte de l'alimentation possible par une nappe, et de la frange de remontée capillaire .

Toutes ces propriétés du sol peuvent être appréciées directement sur le terrain par l'observation détaillée du profil, mais elles doivent fréquemment être précisées par des mesures sur le terrain ou au laboratoire .

a) Observations de terrain . Les possibilités d'infiltration ou de rétention d'eau peuvent être appréciées directement par l'observation de la texture, de la structure ou de la porosité des différents horizons. Les couches imperméables ou à mauvais drainage peuvent être décelées par leur compacité ou par la présence de taches de gley ou pseudogley. Certains horizons compacts artificiellement comme les semelles de labour peuvent être surmontées d'un micro-pseudogley, surtout lorsque les matières organiques s'y accumulent. En période de pluie ou sous irrigation, l'humidité des divers horizons peut être appréciée directement aux doigts .

b) Mesures d'humidité. La meilleure façon de déterminer la réserve en eau du sol est d'effectuer des mesures d'humidité des divers horizons aux différentes périodes de l'année et d'établir ainsi l'évolution saisonnière du " ¹⁹⁶⁵profil hydrique " .

Des mesures faites par AUDRY/au Tchad ont montré comment ces profils hydriques permettent de rendre compte de la végétation des cotonniers par une certaine constance de l'humidité en profondeur et de larges variations dans les horizons de surface.

Ces différentes humidités doivent être rapportées aux humidités caractéristiques du sol qui sont : l'humidité à saturation; l'humidité aux champs, l'humidité équivalente, et le point de flétrissement .

La définition de ces différentes humidités a été donnée dans le chapitre 6 consacré aux mesures physiques. En ce qui concerne l'utilisation de ces données pour les besoins de la pratique, le cas des sols tropicaux doit être considéré particulièrement .

• Point de flétrissement. La donnée la plus importante et aussi la plus caractéristique est le point de flétrissement, il peut se mesurer au laboratoire par l'humidité du sol à pF 4,2 qui correspond sensiblement à l'humidité réelle au-dessous de laquelle les plantes ne peuvent plus puiser d'eau, et qui est peu variable en fonction des états structuraux du sol, alors que l'humidité aux champs est fortement influencée par ces facteurs .

Les différentes humidités mesurées en place pour établir la variation saisonnière du profil hydrique doivent être comparées au point de flétrissement, ce qui permet d'établir la quantité d'eau disponible aux différentes périodes de l'année .

Ces quantités d'eau disponibles peuvent régler le problème des semis ou même de la végétation des cultures, dans certaines régions à pluviométrie limite . C'est ainsi que l'on peut remarquer dans les régions semi-arides, où la pluviométrie est inférieure à 500 mm, que seuls les sols sableux sont utilisés pour la culture traditionnelle, les sols argileux ne pouvant être cultivés que sous irrigation .

En effet, les sols argileux à point de flétrissement trop élevé ne laissent que trop peu d'eau disponible pour les cultures; toutes les pluies, même faibles, sont immédiatement disponibles .

Dans les sols très argileux et très humifères de la zone soudano-guinéenne (1000 à 1200 mm de pluie), certaines cultures peuvent souffrir du manque d'eau, à des humidités élevées dans le sol, car le point de flétrissement se situe au-dessus de 30% (exemple : culture du maïs dans les vallées alluviales du Dahomey).

Rétention d'eau : Dans les pays très humides ou sous irrigation, l'humidité au champ prend une grande importance dans la répartition des cultures.

Cette humidité au champ a donné lieu à de très nombreuses définitions, c'est en principe une humidité assez constante du sol après humectation totale et ressuyage, il ne semble pas possible de la rattacher à une force de succion donnée (pF de 3,5 à 2). Le pF de l'humidité au champ dépend de la texture, de la structure (variable avec le temps), des conditions de tassement, de drainage et d'évaporation. Il est possible cependant, pour des besoins pratiques, en particulier pour l'irrigation, d'utiliser une mesure de succion corrigée par le facteur texture, ou simplement des mesures de terrain effectuées dans des conditions bien définies.

Pour le classement de l'humidité potentielle des sols, il a été établi un indice global tenant compte de la porosité totale, de l'humidité équivalente (pF = 3), du point de flétrissement, ainsi que de la stabilité structurale, cette humidité potentielle a été appelée " humidité édaphique ".

Détermination de l'humidité édaphique : La formule de l'humidité édaphique est la suivante :

$$He = \frac{V \cdot Pu \times Eu}{St}$$

Pu = porosité utile (humidité à saturation - humidité à pF 4,2)

Eu = eau " utilisable " (humidité à pF 3 - humidité à pF 4,2)

St = indice de stabilité structurale, St est calculé d'après l'indice Is d'instabilité et l'indice K de perméabilité en tubes, selon la technique de S. HENIN .

Cet indice relatif tient compte des possibilités d'emménagement (Pu), de rétention (Eu) et d'écoulement (St) de l'eau dans le sol; il représente donc l'eau libre ou faiblement liée; plus ou moins utilisable suivant le cas .

Cet indice est utile dans le cas des sols à drainage externe correct, et permet de classer les sols en : peu humides, moyennement humides et très humides. Un graphique (Fig.17) représen-

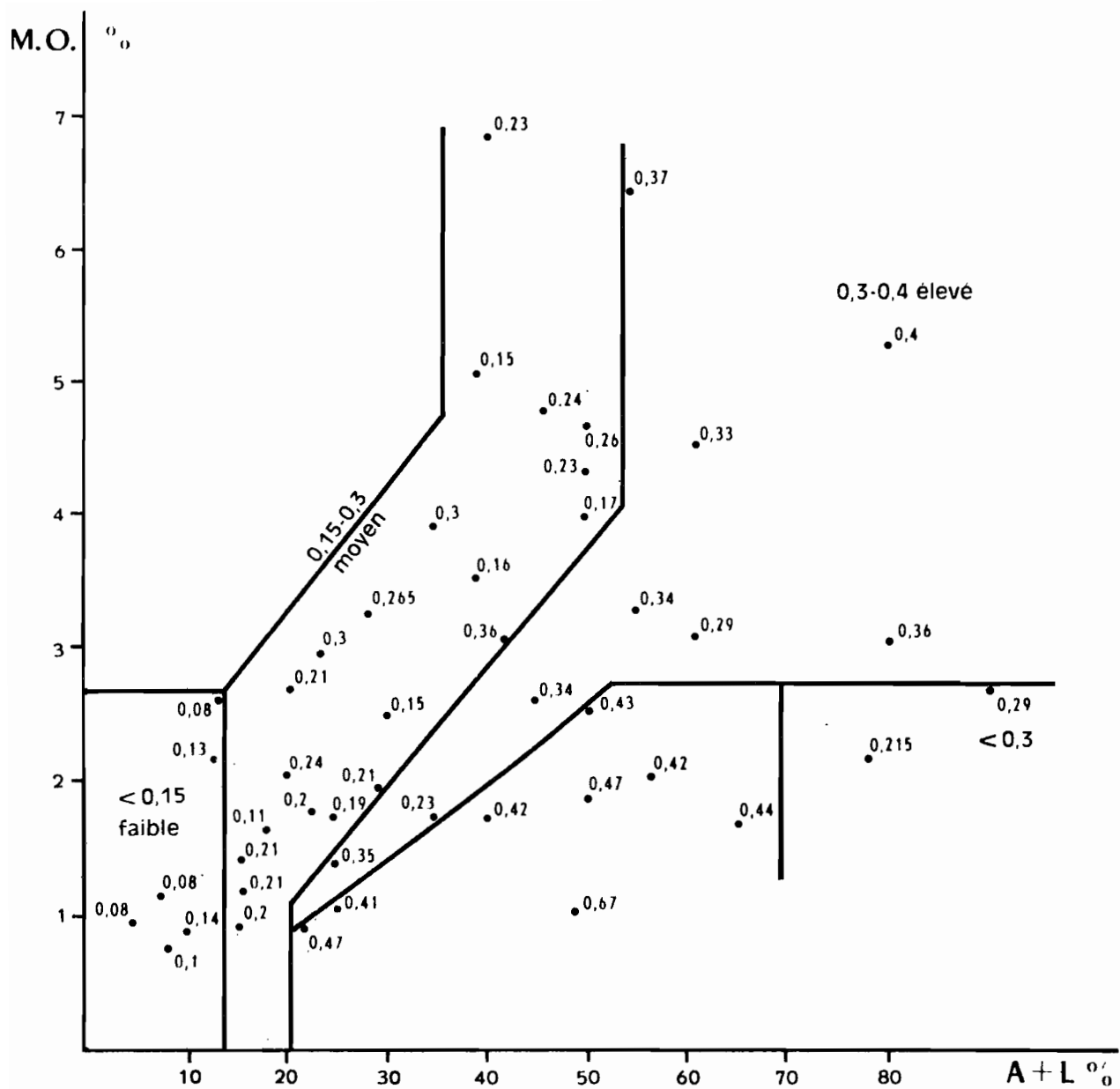


Fig. 18 - L'indice d'humidité en fonction de la matière organique et la somme argile + limon dans les sols ferrallitiques.

te les variations de l'humidité édaphique en fonction de la teneur en " argile + limon " et de la matière organique du sol .

Un chiffre inférieur à 0,15 est faible,

un chiffre entre 0,15 et 0,3 représente une humidité moyenne,

un chiffre supérieur à 0,3 représente une humidité élevée,
et supérieur à 0,4 une humidité très élevée.

D'une manière générale, l'humidité édaphique augmente avec le taux d'éléments fins mais pour les sols à teneur en " argile + limon " élevée, une teneur convenable en matière organique maintient l'humidité édaphique à une valeur moyenne (0,15 - 0,3). Il semble que les valeurs moyennes de l'humidité édaphique sont les plus convenables pour les cultures, néanmoins les humidités édaphiques faibles peuvent convenir à des plantes résistantes à la sécheresse ou à enracinement très profond dans des régions à forte pluviométrie très bien répartie. Les valeurs élevées de l'humidité édaphique peuvent convenir dans des régions à pluviométrie convenable mais mal répartie ou sous irrigation et pour des plantes résistantes à un excès temporaire d'humidité.

C'est ainsi qu'en Basse Côte d'Ivoire, sous une pluviométrie de 1700 à 2000 mm par an, avec moins de trois mois de saison sèche, les cultures de bananier, palmier, cacaoyer peuvent végéter avec une humidité édaphique de l'ordre de 0,15. A la limite de la zone forestière, avec environ 1400 mm de pluie, ces mêmes cultures nécessitent une humidité édaphique de 0,3 et souvent une irrigation d'appoint . Dans les pays relativement humides, la répartition des cultures est fortement influencée par cette " humidité édaphique " qui tamponne plus ou moins l'irrégularité des pluies, mais elle doit être établie pour les différents horizons du profil, et l'adaptation des cultures doit tenir compte des possibilités d'utilisation du sol par le système racinaire des plantes .

P.3.2. Circulation de l'eau dans le sol.

La circulation de l'eau peut se faire dans le sol de haut en bas, c'est le drainage; de bas en haut, c'est la " remontée capillaire "; obliquement, c'est le ruissellement ou l'écoulement dans les horizons supérieurs, ceci dans le cas

des eaux de pluie. L'écoulement peut se faire aussi par les nappes, latéralement et avec des phénomènes de balancement vertical selon les saisons .

a) Observations de terrain.

Drainage et remontée : Ces mouvements de l'eau peuvent être appréciés directement sur le terrain en fonction de la pente, du couvert végétal, du tassement superficiel, de la présence de ravines. L'érosion superficielle en nappe peut être décelée par la disparition de certains horizons supérieurs; l'entraînement de substances solubles ou en suspension provoque des dépôts plus ou moins importants au bas des pentes . L'apport d'eau de ruissellement, la création de mares temporaires est parfaitement visible sur le terrain, même en période sèche .

Le drainage vertical peut s'apprécier sur le terrain grâce à la texture ou à la porosité, par l'état d'oxydation de certains composés (sesquioxides de fer) ou l'évolution des matières organiques ou le développement des racines et leur état sanitaire . La présence de certains horizons caractéristiques : horizons B profonds, ou microhorizons B en " raies ", l'entraînement de certaines substances, humates ou colloïdes, formant des dépôts ou revêtements, donnent une idée de l'importance du lessivage par drainage .

La remontée peut s'apprécier par des dépôts superficiels salins ou humiques ou carbonatés en surface, mais généralement par la détermination directe de la frange capillaire au-dessus de la nappe .

Ce problème de drainage et de remontée capillaire a une importance considérable pour le développement des plantes.

Profondeur de la nappe : Il est nécessaire en premier lieu de déterminer la profondeur de la nappe phréatique. Une nappe trop profonde, surtout dans les pays peu humides, gêne l'installation des cultures en rendant difficile l'installation des villages et l'arrosage possible sur les pentes . Une nappe trop proche de la surface est un obstacle à l'enracinement de nombreuses cultures .

Action de la profondeur de la nappe sur l'enracinement.

Le problème de la profondeur optimum des nappes est fonction du type de plante (profondeur du système racinaire, et résistance à l'excès d'eau dans le sol).

Les tableaux (p. 183 à 185) des exigences en eau des cultures donnent une idée de la résistance à l'humidité, mais il faut y associer la profondeur du système racinaire donné dans d'autres tableaux (tab. p. 208 à 210).

Le bananier et le maïs, par exemple, peuvent végéter avec une nappe assez proche de la surface en raison de la possibilité d'un système racinaire superficiel. La canne à sucre est plus exigeante au point de vue de la profondeur de la nappe, le cacaoyer peut supporter des remontées temporaires de nappe malgré un système racinaire profond. Le caféier ne supporte pas la présence d'une nappe proche de la surface. Cette profondeur de la nappe dépend de la hauteur de la frange capillaire.

Hauteur de la frange capillaire : La frange capillaire ne correspond pas uniquement à la hauteur maximum de remontée capillaire dans un sol donné, mais aussi à la continuité ou à la discontinuité des films d'eau. Ceux-ci peuvent circuler plus ou moins rapidement; ils sont lents dans les sols argileux et plus rapides dans les sols limoneux ou sableux fins, ils peuvent être continus ou discontinus; ils se sectionnent plus facilement dans les sols poreux ou hétérogènes que dans les sols poreux et homogènes.

La remontée pratique, dans les limites d'environ 1 mètre, dépend surtout de la continuité ou de la rupture du film d'eau, fonction de la différence entre la vitesse d'évaporation et de la vitesse de circulation des films d'eau de bas en haut. Dans les pays à très forte évaporation, un sol argileux peut se dessécher superficiellement avec une nappe à 0,60 m, un sol humifère semi-tourbeux se dessèche superficiellement avec une nappe inférieure à 0,40 m. Un sol limoneux ou à sable fin ne se dessèche que si la nappe dépasse 1 mètre de profondeur.

Ces phénomènes de remontée peuvent avoir des conséquences favorables ou défavorables suivant les cas.

Dans les sols semi-tourbeux, il faut éviter que la nappe soit à une profondeur inférieure à 0,40 m car la dessiccation superficielle peut être irréversible, il se crée alors une sorte de mulch naturel complètement déshydraté qui protège le sol contre l'évaporation, mais il ne faut pas que ce mulch devienne trop épais car il est alors néfaste aux racines; de nombreuses cultures de décrue ou même irriguées sont effectuées ainsi dans des cuvettes alluviales (maïs au Niger) ou des zones deltaïques (maïs dans l'Ouémé, Dahomey, bananier dans l'Agneby, Côte d'Ivoire) ou des cuvettes lacustres (polders du Tchad, à sorgho-blé).

Si la nappe remonte trop près de la surface (0,20 m), l'horizon supérieur se trouve à l'état de saturation constante et l'évaporation peut provoquer des mouvements continus de remontée avec des dépôts de sels solubles très importants . Dans le cas des sols limoneux ou à sable fin, il suffit d'une nappe à moins de 1 mètre pour provoquer ces remontées permanentes .

On remarque que dans des pays secs, comme le Tchad, ces sols limoneux ou à sable fin des bourrelets alluviaux sont souvent très fortement alcalins (Naga). Un cas particulier en sol de rizière (Delta central nigérien) est l'absence de durcissement superficiel de la surface du sol après vidange, pour permettre le passage d'engins mécaniques de récolte .

En pays humide (Côte d'Ivoire), les cultures bananières dans ces bas-fonds limoneux nécessitent des travaux de drainage à environ 1 mètre de profondeur pour éviter l'asphyxie des plantes .

b) Calcul d'un indice de drainage. Indépendamment des données morphologiques et des observations directes permettant de juger le drainage et la remontée, il existe de nombreuses mesures de la porosité et de la perméabilité sur le terrain, elles ont été indiquées dans le chapitre 6 .

Il a été établi une technique de laboratoire fondée sur les études de stabilité structurale de S. HENIN . La mesure de perméabilité (indice K) est effectuée à saturation dans un tube de verre sur échantillon remanié (tamisé à 2 mm). La terre est tassée sous un excès d'eau, par simple effet de quelques rotations horizontales rapides, puis on mesure la percolation de l'eau

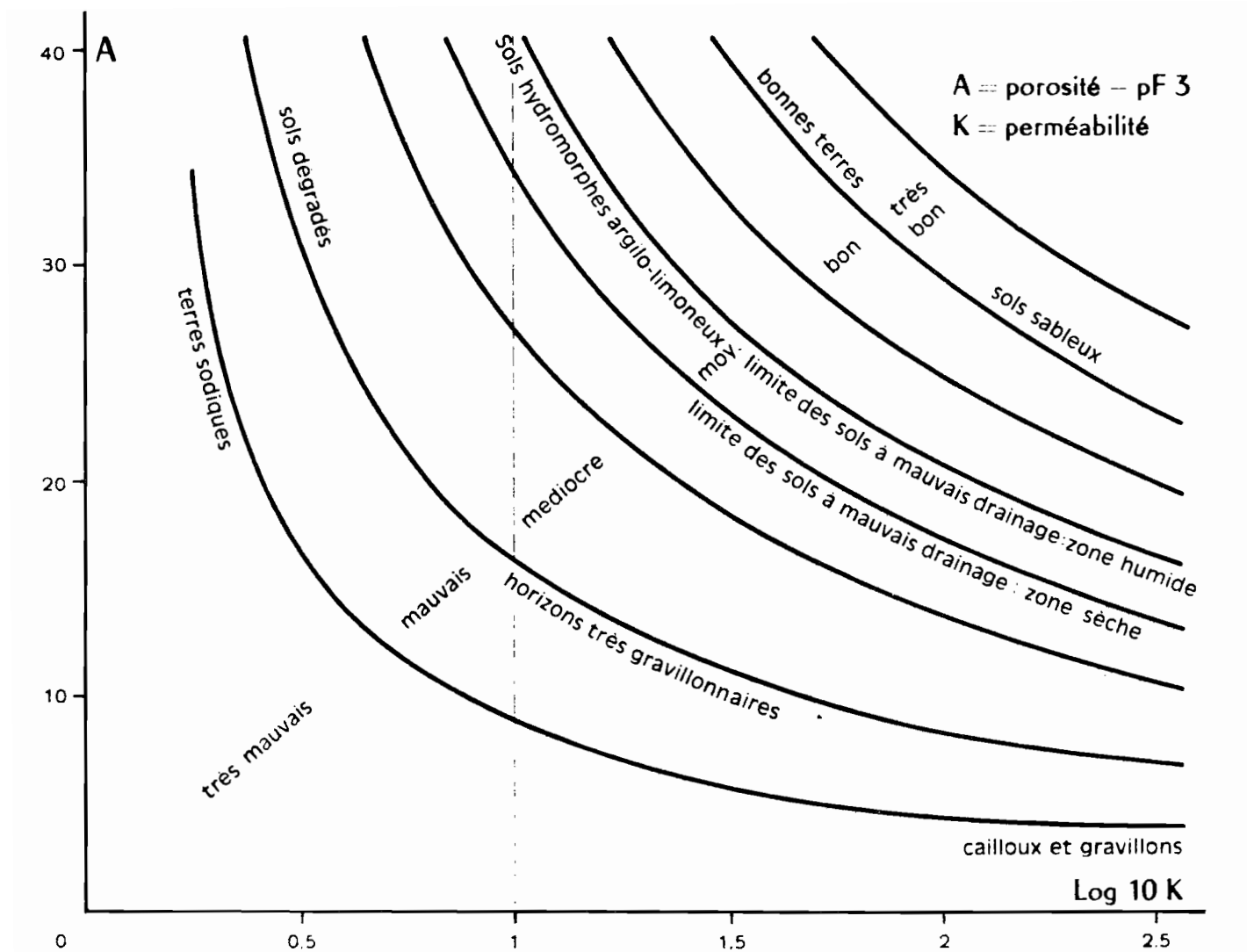


Fig. 17 - L'indice de drainage en fonction de la porosité et de la perméabilité.

pendant une heure sous charge constante.

Pour les sols tropicaux, on rajoute à la terre tanisée les divers graviers et gravillons qu'elle contient. Ceci permet, après tassement maximum, d'obtenir une densité apparente assez proche de celle que l'on peut mesurer sur un sol en place très humide. Connaissant la densité réelle du sol, on peut calculer la porosité à saturation :

$$P \% = 100 \left(1 - \frac{d_a}{d_r} \right) \quad \begin{array}{l} d_a = \text{densité apparente} \\ d_r = \text{densité réelle} \end{array}$$

Si l'on retranche l'humidité à pF 3 (calculé en volume %) de la porosité totale on obtient la valeur A qui peut être appelée capacité pour l'air ; c'est un chiffre conventionnel mais dont la mesure est reproductible .

Dans un type de sol à mauvais drainage (par exemple vertisol lithomorphe du Togo), on a pu établir une corrélation entre la valeur de A et le rendement en coton . Par contre, dans des types de sol différents en Côte d'Ivoire où la nappe phréatique est peu profonde, il n'existe pas de corrélation entre la valeur de A et le rendement en banane . Il existe toutefois une très bonne corrélation lorsqu'on multiplie la capacité pour l'air par le logarithme de l'indice de perméabilité : $A \times \log_{10} K$. Ce produit a été appelé indice de drainage ou indice de ressuyage. La corrélation avec les rendements est meilleure que celle des composantes employées seules .

Exemple: quelques résultats de culture de bananier en Côte d'Ivoire :

	A%	Log. 10 K.	Ind. de ressuyage
Tourbe peu évoluée en terrain mal drainé - rendement très mauvais	41	0,47	19
Tourbe cultivée depuis 22 ans rendement très bon	42	2,17	91
Sol alluvial argileux rendement médiocre	31,6	1,42	44
Sol alluvial sablo-argileux rendement bon	42,3	1,55	66

Les deux premiers sols ont des capacités pour l'air identiques mais des indices de perméabilité différents . Les deux sols suivants ont des indices de perméabilité voisins mais des capacités pour l'air différentes. L'indice de ressuyage reflète bien des différences de rendement .

Même avec des indices de perméabilité relativement élevés, certains vertisols argileux ont des rendements très médiocres en raison d'une faible capacité pour l'air ainsi que l'indiquent les valeurs suivantes : $A = 26,04$ Log 10 K 1,6 - Ind. ressuyage 41. Mais, dans les mêmes sols bien travaillés et bien fumés, la valeur de A peut atteindre 36% et le rendement augmente considérablement .

Le travail du sol peut permettre l'amélioration de l'indice de drainage en augmentant la valeur de A sur le terrain. La valeur de A mesurée au laboratoire est une valeur minimum d'équilibre .

Normes d'interprétation pour l'indice de drainage. Cet indice a été établi pour de nombreux sols et a permis le classement suivant :

supérieur à 70	exceptionnel
60-70	très bon
50-60	bon
40-50	noyen
35-40	médiocre à mauvais
inférieur à 35	mauvais

Représentation graphique (Fig. 18). Le graphique joint permet un classement plus précis par zone, en portant en abscisse le Log 10 K et en ordonnée la valeur de A, les sols ayant un même indice de drainage se trouvent sur une même branche d'hyperbole; néanmoins, les sols relativement argileux ou humifères ont une valeur de A élevée et une valeur de Log 10 K faible alors que les sols sableux ou graveleux ou gravillonnaires ont une valeur A très faible et une valeur Log 10 K très élevée .

Dans la plupart des sols tropicaux, l'indice de drainage diminue de la surface vers la profondeur en même temps que la disparition de l'humus. Il est souvent limite et inférieur à

40 dans les sols hydromorphes argilo-limoneux, il est inférieur à 20 dans les sols dégradés par la culture et l'érosion, à 10 dans les terres sodiques ou très caillouteuses .

9.3.3. La structure du sol.

9.3.3.1. L'étude de la structure sur le terrain.

Définition de la structure. La structure du sol a été jugée d'une telle importance dans toutes les études de sol qu'elle a fait l'objet de nombreuses codifications. C'est un des éléments essentiels de la caractérisation des profils, la définition des différents horizons doit être accompagnée d'une description détaillée de la structure. (cf. chapitre 5, paragraphe 5.5.).

Cette structure a un sens pédogénétique, elle peut marquer l'évolution d'un horizon, le lessivage, l'accumulation, la dégradation; certaines structures particulières (structures en colonnes arrondies au sommet, dans les solonetz solodisés) sont spécifiques de certains types d'évolution. Du point de vue fertilité, la structure agit en tant qu'architecture de la couche de sol où s'enfoncent les racines et où circulent l'eau et l'air. Les systèmes de fentes, les cavités diverses, les cailloux ou blocs et enfin les divers éléments structuraux simples ou composés et leur assemblage représentent la structure prise au sens large . En fait, tout ce qui peut concourir au passage des racines ou des fluides ou au contraire lui faire obstacle peut être considéré comme relevant de la structure .

Au sens restreint, la structure représente un arrangement de particules minérales provenant de la destruction des roches ou de dépôts divers, par concentration en petites unités séparées sous l'influence prépondérante des matières organiques . L'évolution de la structure sous l'influence de l'action biologique va vers la formation d'agrégats complexes de nœuds en nœuds individualisés.

La destruction de la structure va au contraire vers la séparation des éléments particuliers et leur simple juxtaposition en masse. Entre les deux extrêmes existe toute une série d'intermédiaires avec des assemblages de formes et de dimensions variables.

L'importance de la structure réside aussi dans le fait qu'elle indique non seulement un certain état d'aneublissement du sol, une certaine porosité, une aptitude plus ou moins grande au drainage, à l'aération, au travail du sol, ou à la pénétration du système racinaire, mais elle indique également un degré de fertilité générale .

Les éléments qui par leur interaction concourent à la formation d'une structure de type " évolué " sont ceux dont l'influence sur la fertilité est prépondérante, en particulier la richesse en humus et la richesse en cations basiques, en particulier en calcium. Dans un même profil, la dégradation de la structure, de la surface vers la profondeur est, en grande partie, liée à la diminution progressive ou brutale du taux d'humus et aussi à certaines variations du taux de calcium . Par exemple, dans un sol argileux, la structure peut être grumeleuse en surface s'il est humifère, puis devenir progressivement polyédrique de plus en plus grossière et même prismatique en profondeur .

La présence permanente de l'eau en excès ne permet pas à la structure de bien s'individualiser même si elle existe à l'état latent . L'ion sodium est également un facteur de destruction de la structure; son élimination du complexe, au moins partiellement, est une nécessité pour obtenir une bonne structure .

Le classement des structures au point de vue de la fertilité des sols dépend beaucoup de la texture; en effet, les textures se classent différemment en ce qui concerne la fertilité; les textures moyennes étant les plus favorables et les textures extrêmes les plus défavorables .

Classement des textures et action sur la fertilité. D'après DURAND, l'action de la texture peut s'évaluer comme suit :

I	Texture très fine (argileux-limoneux)	30 à 60%	de la fertilité maximum
II	Texture fine (argilo-sableux, limon argileux)	80%	
III	Texture moyenne (limoneux limon sableux fin ou sablo-argileux)	100%	
IV	Texture grossière (limon sableux sable limoneux)	80%	
V	Texture très grossière (sables)	50%	

Limite des Textures Simplifiées ———

Limite des Textures - - - - -

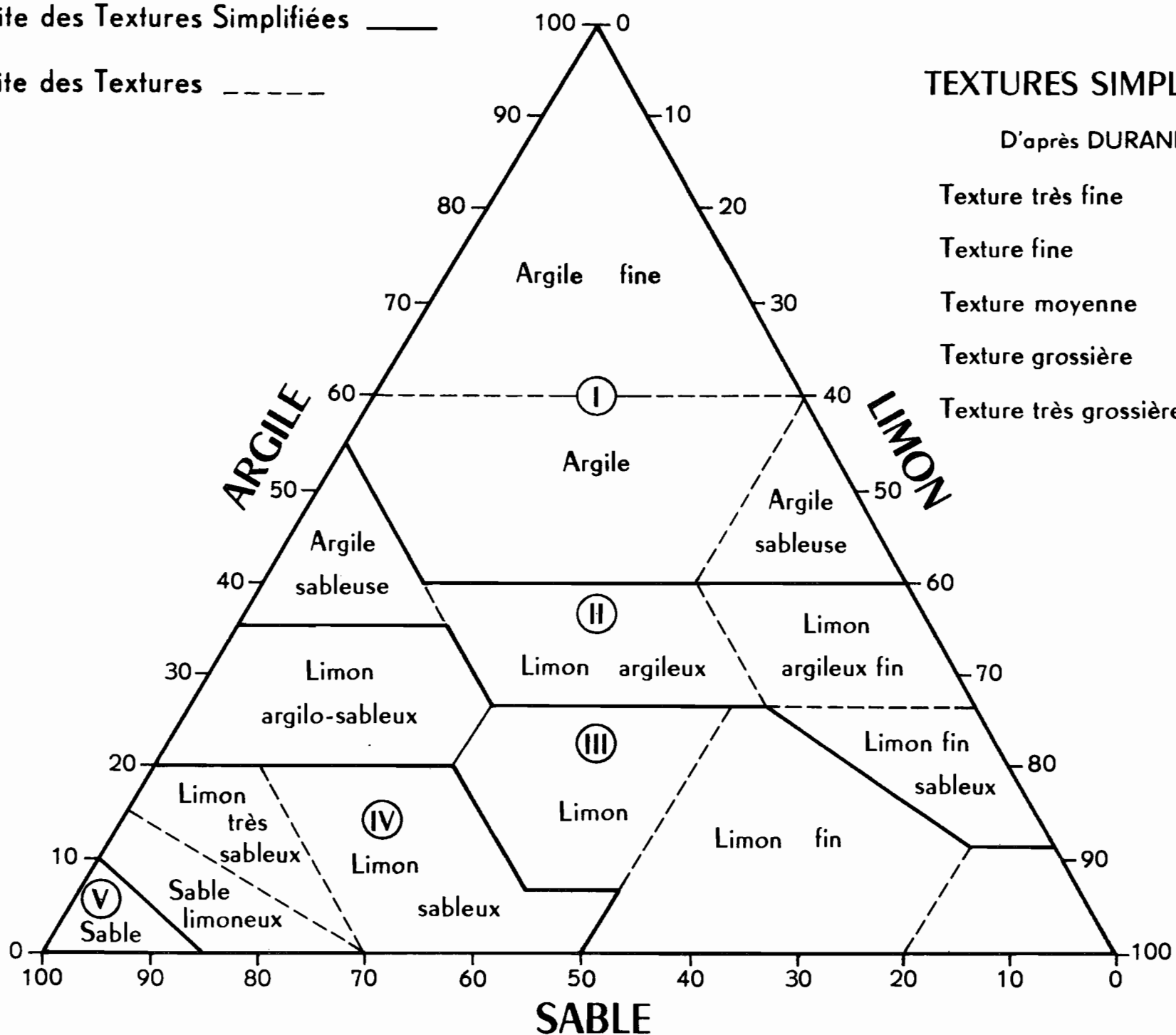
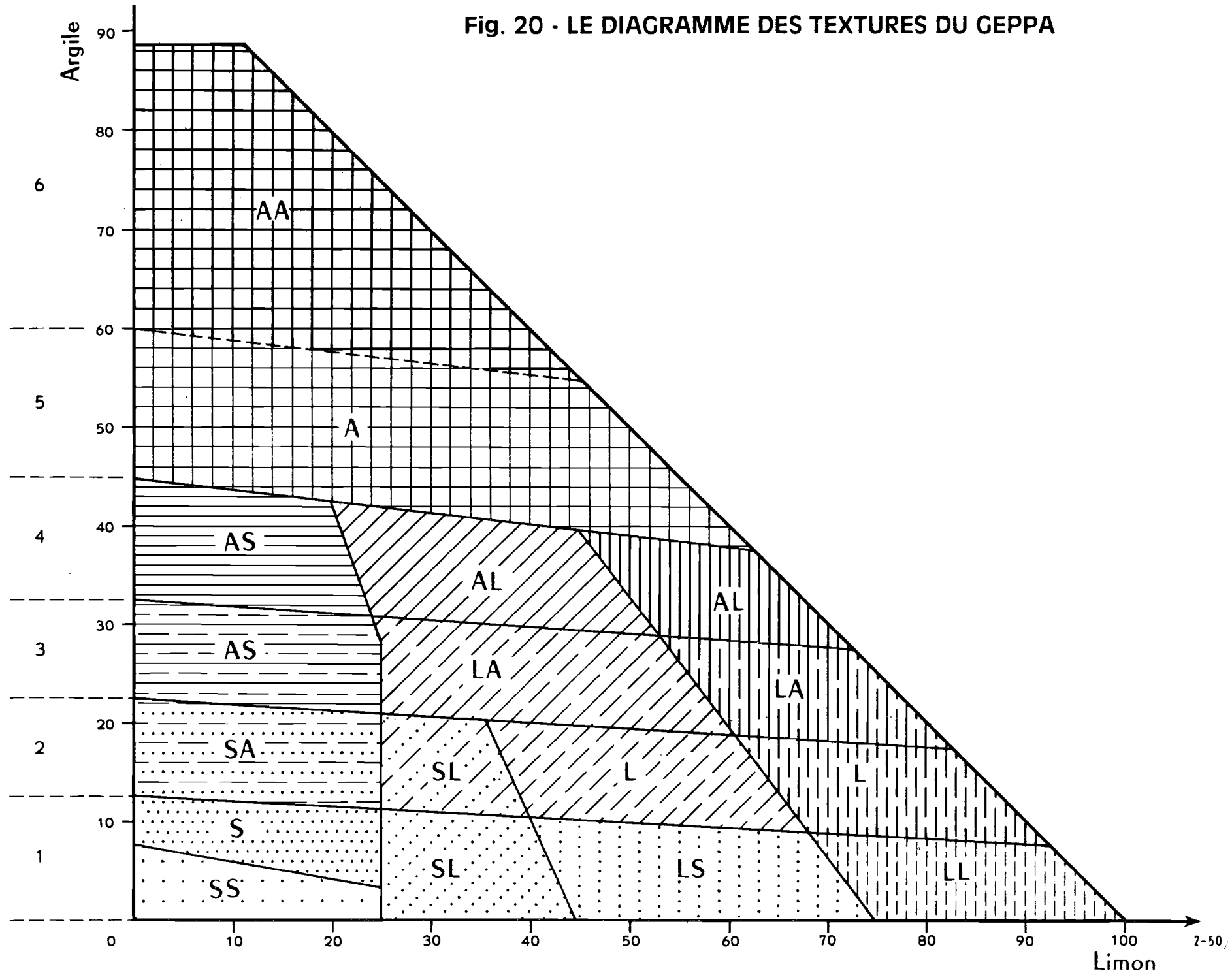


Fig. 19 - Le diagramme des textures d'après DURAND.

Fig. 20 - LE DIAGRAMME DES TEXTURES DU GEPPA



DURAND se réfère à un triangle des textures montrant la classification simplifiée en 5 classes (Fig. 19). Le triangle simplifié des textures du GEPPA est également présenté (Fig.20). Cette texture est largement corrigée par la structure . L'action de la texture sur la fertilité peut être variable suivant le climat.

Le tableau suivant (N°7,) indique les incidences de la texture sur la structure et la fertilité .

Texture	Structure		Fertilité
	Structure	Fertilité	
Texture 1	Structure 1	Fertilité 1	Texture 1
Texture 2	Structure 2	Fertilité 2	Texture 2
Texture 3	Structure 3	Fertilité 3	Texture 3
Texture 4	Structure 4	Fertilité 4	Texture 4
Texture 5	Structure 5	Fertilité 5	Texture 5
Texture 6	Structure 6	Fertilité 6	Texture 6
Texture 7	Structure 7	Fertilité 7	Texture 7
Texture 8	Structure 8	Fertilité 8	Texture 8
Texture 9	Structure 9	Fertilité 9	Texture 9
Texture 10	Structure 10	Fertilité 10	Texture 10
Texture 11	Structure 11	Fertilité 11	Texture 11
Texture 12	Structure 12	Fertilité 12	Texture 12
Texture 13	Structure 13	Fertilité 13	Texture 13
Texture 14	Structure 14	Fertilité 14	Texture 14
Texture 15	Structure 15	Fertilité 15	Texture 15
Texture 16	Structure 16	Fertilité 16	Texture 16
Texture 17	Structure 17	Fertilité 17	Texture 17
Texture 18	Structure 18	Fertilité 18	Texture 18
Texture 19	Structure 19	Fertilité 19	Texture 19
Texture 20	Structure 20	Fertilité 20	Texture 20
Texture 21	Structure 21	Fertilité 21	Texture 21
Texture 22	Structure 22	Fertilité 22	Texture 22
Texture 23	Structure 23	Fertilité 23	Texture 23
Texture 24	Structure 24	Fertilité 24	Texture 24
Texture 25	Structure 25	Fertilité 25	Texture 25
Texture 26	Structure 26	Fertilité 26	Texture 26
Texture 27	Structure 27	Fertilité 27	Texture 27
Texture 28	Structure 28	Fertilité 28	Texture 28
Texture 29	Structure 29	Fertilité 29	Texture 29
Texture 30	Structure 30	Fertilité 30	Texture 30
Texture 31	Structure 31	Fertilité 31	Texture 31
Texture 32	Structure 32	Fertilité 32	Texture 32
Texture 33	Structure 33	Fertilité 33	Texture 33
Texture 34	Structure 34	Fertilité 34	Texture 34
Texture 35	Structure 35	Fertilité 35	Texture 35
Texture 36	Structure 36	Fertilité 36	Texture 36
Texture 37	Structure 37	Fertilité 37	Texture 37
Texture 38	Structure 38	Fertilité 38	Texture 38
Texture 39	Structure 39	Fertilité 39	Texture 39
Texture 40	Structure 40	Fertilité 40	Texture 40
Texture 41	Structure 41	Fertilité 41	Texture 41
Texture 42	Structure 42	Fertilité 42	Texture 42
Texture 43	Structure 43	Fertilité 43	Texture 43
Texture 44	Structure 44	Fertilité 44	Texture 44
Texture 45	Structure 45	Fertilité 45	Texture 45
Texture 46	Structure 46	Fertilité 46	Texture 46
Texture 47	Structure 47	Fertilité 47	Texture 47
Texture 48	Structure 48	Fertilité 48	Texture 48
Texture 49	Structure 49	Fertilité 49	Texture 49
Texture 50	Structure 50	Fertilité 50	Texture 50
Texture 51	Structure 51	Fertilité 51	Texture 51
Texture 52	Structure 52	Fertilité 52	Texture 52
Texture 53	Structure 53	Fertilité 53	Texture 53
Texture 54	Structure 54	Fertilité 54	Texture 54
Texture 55	Structure 55	Fertilité 55	Texture 55
Texture 56	Structure 56	Fertilité 56	Texture 56
Texture 57	Structure 57	Fertilité 57	Texture 57
Texture 58	Structure 58	Fertilité 58	Texture 58
Texture 59	Structure 59	Fertilité 59	Texture 59
Texture 60	Structure 60	Fertilité 60	Texture 60
Texture 61	Structure 61	Fertilité 61	Texture 61
Texture 62	Structure 62	Fertilité 62	Texture 62
Texture 63	Structure 63	Fertilité 63	Texture 63
Texture 64	Structure 64	Fertilité 64	Texture 64
Texture 65	Structure 65	Fertilité 65	Texture 65
Texture 66	Structure 66	Fertilité 66	Texture 66
Texture 67	Structure 67	Fertilité 67	Texture 67
Texture 68	Structure 68	Fertilité 68	Texture 68
Texture 69	Structure 69	Fertilité 69	Texture 69
Texture 70	Structure 70	Fertilité 70	Texture 70
Texture 71	Structure 71	Fertilité 71	Texture 71
Texture 72	Structure 72	Fertilité 72	Texture 72
Texture 73	Structure 73	Fertilité 73	Texture 73
Texture 74	Structure 74	Fertilité 74	Texture 74
Texture 75	Structure 75	Fertilité 75	Texture 75
Texture 76	Structure 76	Fertilité 76	Texture 76
Texture 77	Structure 77	Fertilité 77	Texture 77
Texture 78	Structure 78	Fertilité 78	Texture 78
Texture 79	Structure 79	Fertilité 79	Texture 79
Texture 80	Structure 80	Fertilité 80	Texture 80
Texture 81	Structure 81	Fertilité 81	Texture 81
Texture 82	Structure 82	Fertilité 82	Texture 82
Texture 83	Structure 83	Fertilité 83	Texture 83
Texture 84	Structure 84	Fertilité 84	Texture 84
Texture 85	Structure 85	Fertilité 85	Texture 85
Texture 86	Structure 86	Fertilité 86	Texture 86
Texture 87	Structure 87	Fertilité 87	Texture 87
Texture 88	Structure 88	Fertilité 88	Texture 88
Texture 89	Structure 89	Fertilité 89	Texture 89
Texture 90	Structure 90	Fertilité 90	Texture 90
Texture 91	Structure 91	Fertilité 91	Texture 91
Texture 92	Structure 92	Fertilité 92	Texture 92
Texture 93	Structure 93	Fertilité 93	Texture 93
Texture 94	Structure 94	Fertilité 94	Texture 94
Texture 95	Structure 95	Fertilité 95	Texture 95
Texture 96	Structure 96	Fertilité 96	Texture 96
Texture 97	Structure 97	Fertilité 97	Texture 97
Texture 98	Structure 98	Fertilité 98	Texture 98
Texture 99	Structure 99	Fertilité 99	Texture 99
Texture 100	Structure 100	Fertilité 100	Texture 100

ACTION DE LA STRUCTURE SUR LA FERTILITE

Tableau de correspondance entre texture
structure et fertilité
(sols d'Afrique Occidentale)

Tableau 7

Action de la structure sur la fertilité		Texture	Argileux	Argilo-	Limono-	Limoneux	Limono-	
en profondeur		Struc- ture	argilo- limoneux	sableux	argileux	ou sabls argileux	sableux	Sableux
en surface		indice de structu- re	grenue	grenue	grenue à grumeleu- se	grume- leuse		
	Exceptionnel							
	très bon	1600 à 1900	grume- leuse	grume- leuse	grume- leuse	grume- leuse		
	bon	1300 à 1600	polyé- drique fine	polyédri- que fine	grumeleu- se peu in- dividua- lisée ou agglomé- rée	grume- leuse peu indi- viduali- sée	grume- leuse peu in- dividua- lisée	
bon	moyen	1100 à 1300	polyé- drique moyenne	polyédri- que moyenne	fondue à tendance polyédri- que	fondue assez meuble	fondue très meuble	grume- leuse
moyen	médiocre	800 à 1100	polyé- drique grossière	polyédri- que gros- sière tendance compacte	compacte	fondue assez compacte	fondue peu compacte	particu- laire liée
médiocre	mauvais	500 à 800	polyé- drique très grossière	compacte	très compacte	compacte	assez compacte	particu- laire fine
mauvais	très mauvais	200 à 500	prisma- tique ou colum- naire ou com- pacte	très compacte	très compacte	très compacte	très compacte ou pulvéru- lente	particu- laire grossière

Ce tableau donne (pour chaque texture) des indications conventionnelles sur les assemblages structuraux, avec des correspondances concernant la fertilité en surface et en profondeur et les indices de structure calculés . Ce tableau peut être sujet à discussion, car les indications sont simplifiées et font référence à l'aspect, à la dimension ou à la cohésion des structures. Par exemple, la structure grumeleuse représente des grains plus petits et moins réguliers que la structure grenue, mais néanmoins arrondis . Lorsque ces petits grains irréguliers ne se détachent pas bien les uns des autres ou sont collés plus ou moins fortement: c'est la structure grumeleuse peu individualisée ou agglomérée. Structure polyédrique signifie forme anguleuse, les grains les plus petits représentent les structures les meilleures (polyédrique fine), les éléments les plus gros signifiant les structures les moins bonnes (polyédrique grossière, prismatique).

Lorsqu'on arrive à l'absence d'éléments individualisés, on utilise le terme " fondu ". Au point de vue fertilité, il est nécessaire alors de compléter par une évaluation de la cohésion de la masse qui se brise plus ou moins facilement entre les doigts . Par exemple : Fondu assez meuble, signifie une masse sans éléments individualisés mais qui s'écrase facilement dans les doigts à l'état sec; Compact et très compact indique également des structures fondues mais qui sont difficiles ou même impossibles à écraser entre les doigts .

Dans le tableau ci-contre, il est possible de constater que pour un même niveau de fertilité, les textures extrêmes présentent une structure plus " évoluée " que les textures moyennes. Relation entre structure physique et richesse chimique. Ce niveau de fertilité " physique " est corrélatif du niveau de fertilité " chimique", surtout en ce qui concerne quelques uns des facteurs essentiels de la fertilité chimique, matière organique et pH .

Un sol argileux à structure grumeleuse, indique un sol assez riche en matière organique et en bases. Un sol limoneux à structure battante indique une richesse chimique médiocre; pour cette même texture, un sol meuble est plus riche, et un sol compact est plus pauvre. En ce qui concerne les sols sableux, ils

sont d'autant plus pauvres qu'ils ont une structure particulière plus grossière. Cette corrélation entre la richesse chimique et la structure peut être fortement perturbée lorsque l'ion sodium intervient, des sols chimiquement riches peuvent avoir une structure fortement dégradée par l'action de cet ion.

Structure des horizons de profondeur; interprétation du profil .

Dans les horizons de profondeur, les structures peuvent être plus médiocres que dans les horizons de surface (pour une même fertilité).

Il est possible d'intégrer les coefficients de texture des différents horizons d'un profil pour obtenir une texture moyenne, la même opération peut être faite sans doute pour la structure. Néanmoins, il est indispensable de considérer séparément les structures des divers horizons dans la mesure où ceux-ci peuvent constituer des facteurs limitants à la pénétration des racines .

Conclusion concernant l'étude de la structure sur le terrain. Les études de terrain sont essentielles dans l'évaluation de la structure car elles permettent seules de porter un jugement d'ensemble sur la qualité du profil :

L'observation détaillée à chaque niveau des discontinuités structurales ou texturales et du comportement correspondant des racines est appelée par HENIN " profil cultural ". Ce profil cultural peut se confondre dans certains cas avec le profil pédologique, mais dans d'autres cas, il comporte des discontinuités artificielles dues à l'action de l'homme . Le travail du sol crée un amaublissement superficiel ou profond dans le cas du sous-solage. Il peut produire également des tassements superficiels ou à faible profondeur; c'est la " semelle de labour ". Cette semelle de labour peut avoir une très grande importance dans la pénétration des racines, et il est nécessaire de la localiser .

9.3.3.2 Evaluation chiffrée de la structure. Calcul d'un indice de structure.

L'appréciation aux doigts et à l'oeil ne permet pas toujours de chiffrer exactement la qualité de la

structure. Cette qualité de la structure peut correspondre à l'état structural à un moment donné mais elle dépend surtout de propriétés intrinsèques au sol qui sont : la stabilité structurale et la distribution de la porosité .

La stabilité structurale a été mesurée par de nombreuses méthodes. L'une des plus utilisées par les pédologues français est celle de HENIN qui détermine la stabilité des agrégats de 2 mm par tamisage sous l'eau. Les deux principales mesures sont : pourcentage d'agrégats stables de diamètre supérieur à 0,2 mm et pourcentage d'éléments fins passant en suspension.

La formule est la suivante :

$$Is = \frac{A + L \text{ (maximum) } \%}{\frac{\text{Agr air} + \text{Agr Alcool} + \text{Agr Benzène}}{3} - 0,9 \text{ sable grossier}}$$

Agrégats : air, alcool et benzène indiquent les différents prétraitements qui ont été effectués sur le sol avant le tamisage sous l'eau.

A + L : indique la dispersion maximum en (argile + limon) obtenue au cours des divers prétraitements .

Is : porte le nom d'Indice d'Instabilité car il est d'autant plus élevé que le sol est instable.

Les sols de bonne stabilité ont généralement une valeur Is inférieure à 1 .

L'indice de perméabilité K en cm par heure, mesuré dans les tubes de verre, complète l'indice d'instabilité. Il existe une relation linéaire entre Log 10 Is et Log 10 K. La perméabilité diminue lorsque Is augmente et inversement .

Il est possible de rassembler les deux indices en une formule unique appelée stabilité structurale .

$$St = 20 (2,5 + \text{Log } 10 K - 0,837 \text{ Log } 10 Is)$$

St varie de 0 à 100. Les valeurs bonnes de la stabilité structurale se situent au-dessous de 80, les valeurs moyennes vers 50 - 60, les valeurs mauvaises au-dessous de 30 .

Indice de structure . En réalité, si dans un sol donné, la qualité de la structure varie dans le même sens que la stabilité structurale, par contre dans des sols différents, chaque valeur de stabilité structurale peut correspondre à des fertilités très variées. En particulier, des sols sableux peu fertiles peuvent

avoir des stabilités structurales très élevées (90-100). En revanche, des sols argileux fertiles peuvent avoir des stabilités structurales plus faibles .

Pour une même stabilité structurale, la fertilité du sol augmente avec la capacité de rétention pour l'eau. Pour chiffrer globalement la qualité de la structure, il a été établi un indice qui est le suivant :

$$\text{Indice de structure} : St \times \sqrt{Pu \times Eu}$$

St = Stabilité structurale

Pu = Porosité utile = humidité à saturation - pF 4,2

Eu = Eau utile = humidité à pF 3 - humidité à pF 4,2

Cet indice a été calculé pour de nombreux sols, les chiffres obtenus peuvent être interprétés comme suit :

exceptionnel	sup. à 1900
très bon	1600 à 1900
bon	1300 à 1600
moyen	1100 à 1300
médiocre	800 à 1100
mauvais	inf. à 800

Représentation graphique de l'indice de structure .
(Fig. 21)

Sur un graphique portant en abscisse St et en ordonnée $\sqrt{Pu \times Eu}$, les sols de même qualité structurale se situent sur une même branche d'hyperbole .

Suivant leur position sur le graphique, les points se distinguent par une humidité édaphique .

$$He = \frac{\sqrt{Pu \times Eu}}{St}$$

Exemples. Un très bon sol argileux et humifère, bien drainé, sur roche basique, aura un indice de structure de 2000 avec St = 100 et $\sqrt{Pu \times Eu} = 20$. L'humidité édaphique sera $\frac{20}{100} = 0,2$ moyenne .

Pour un sol hydromorphe de fertilité comparable, argileux et humifère, l'indice de structure sera le même 2000 avec St = 50 et $\sqrt{Pu \times Eu} = 40$.

L'humidité édaphique sera alors $\frac{40}{50} = 0,8$ très élevée.

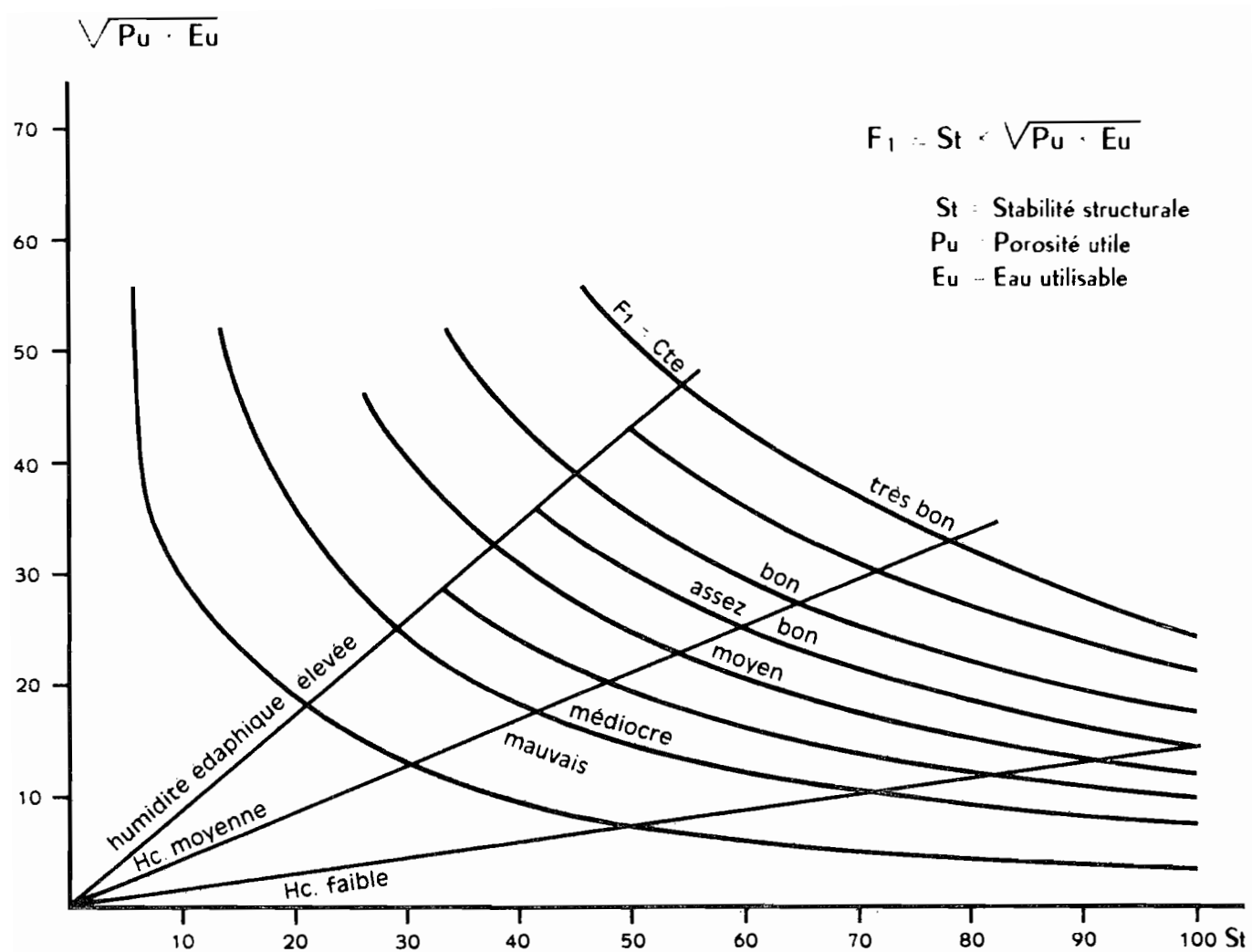


Fig. 21 - L'indice de structure en fonction de la matière organique et de la somme argile + limon.

Sols ferrugineux tropicaux lessivés. Très bon rendement en coton (3000 Kg par ha). $St = 68$. Indice de structure 1700 et $V \overline{Pu \times Eu} = 25$. L'humidité édaphique = 0,37.

Sol dégradé par la culture et l'érosion. Rendement en coton très bas. $St = 52$. Indice de structure 620 et $V \overline{Pu \times Eu}$. Humidité édaphique 0,23.

Sols ferrallitiques typiques (sols rouges sur schistes et granite). Rendement moyen à bon en banane (14 tonnes/ha). $St = 70$. Indice de structure 1400 et $V \overline{Pu \times Eu} = 20$. Humidité édaphique 0,29.

Sols ferrallitiques très dégradés (sur schistes et granite) Vieille bananeraie 3 à 4 tonnes/ha (mauvaise). $St = 45$. Indice de structure 550 et $V \overline{Pu \times Eu} = 12$. Humidité édaphique 0,27.

Vieille cacaoyère médiocre (500 Kg/ha). $St = 60$. Indice de structure 960 et $V \overline{Pu \times Eu} = 16$. Humidité édaphique 0,27.

Sols ferrallitiques très lessivés sur sable . Fertilité bonne (cacao 1200 Kg/ha). $St = 100$. Indice de structure 1600. et $V \overline{Pu \times Eu} = 16$. Humidité édaphique 0,16.

Sols très dégradés. Fertilité mauvaise (cacao 160 Kg/ha) $St = 70$. Indice de structure 700 et $V \overline{Pu \times Eu} = 10$. Humidité édaphique 0,15.

Une relation statistique a pu être établie pour différents sols et différentes cultures entre l'indice de structure et les rendements . Les coefficients de corrélation sont meilleurs pour l'indice global que pour les différentes composantes prises séparément.

Eléments agissant sur l'indice de structure.

La matière organique est le principal facteur (Fig. 22), elle doit être bien décomposée, ce qui est le cas de la plupart des sols tropicaux.

Dans certaines tourbes, les teneurs en matière organique sont élevées, mais des matières organiques très grossières ne donnent que de faibles indices de structure . Dans les tourbes grossières, la teneur en eau utilisable est à peu près nulle. Lorsque les tourbes évoluent, la matière organique

se transforme en humus et l'eau utilisable croît rapidement ainsi que l'indice St. Les tourbes évoluées ont de très bons indices de structure .

Argile + Limon. La fig. 22 représente les variations d'indice de structure en fonction de la teneur " argile + limon " dans les sols ferrallitiques. Plus les sols sont riches en éléments fins et plus ils nécessitent de fortes teneurs en matière organique pour obtenir une bonne structure .

En profondeur dans les sols ferrallitiques ou ferrugineux tropicaux lessivés, il n'y a que très peu de matière organique, par contre, la teneur relative en éléments fins (argile + limon) et en éléments grossiers (graviers, gravillons) joue un grand rôle dans la valeur de l'indice de structure. (Fig. 23).

La matière organique et éléments fins agissent surtout sur la répartition de la porosité et la répartition de l'eau .

Bases échangeables. La valeur de St est largement conditionnée par la teneur en calcium et en magnésium du sol .

Le rapport $\frac{Ca + Mg}{T}$ (où T est la capacité d'échange), a une action importante sur la valeur de St des sols très argileux et peu humifères. Certains vertisols peuvent être bien structurés en surface en raison de leur richesse en ion Calcium) . Par contre, le sodium, (en particulier le rapport $\frac{Na}{Ca + Mg}$) peut avoir une action très néfaste sur St. Cette action néfaste commence aux basses teneurs, 2 à 5% ; elle est très importante au delà de 10% .

Conclusion . Les meilleurs indices de structure sont observés : soit dans certains sols alluviaux argileux et humifères (4 à 8 % de matière organique), soit dans des sols sur roches basiques, faiblement ferrallitiques ou bruns eutrophes (3 à 6 % de matière organique). La différence réside dans le fait que l'humidité édaphique est toujours plus élevée dans les sols hydromorphes que dans les sols ferrallitiques ou bruns eutrophes. Pour tous ces sols, l'indice de structure décroît toujours de la surface vers la profondeur avec la disparition de la matière organique .

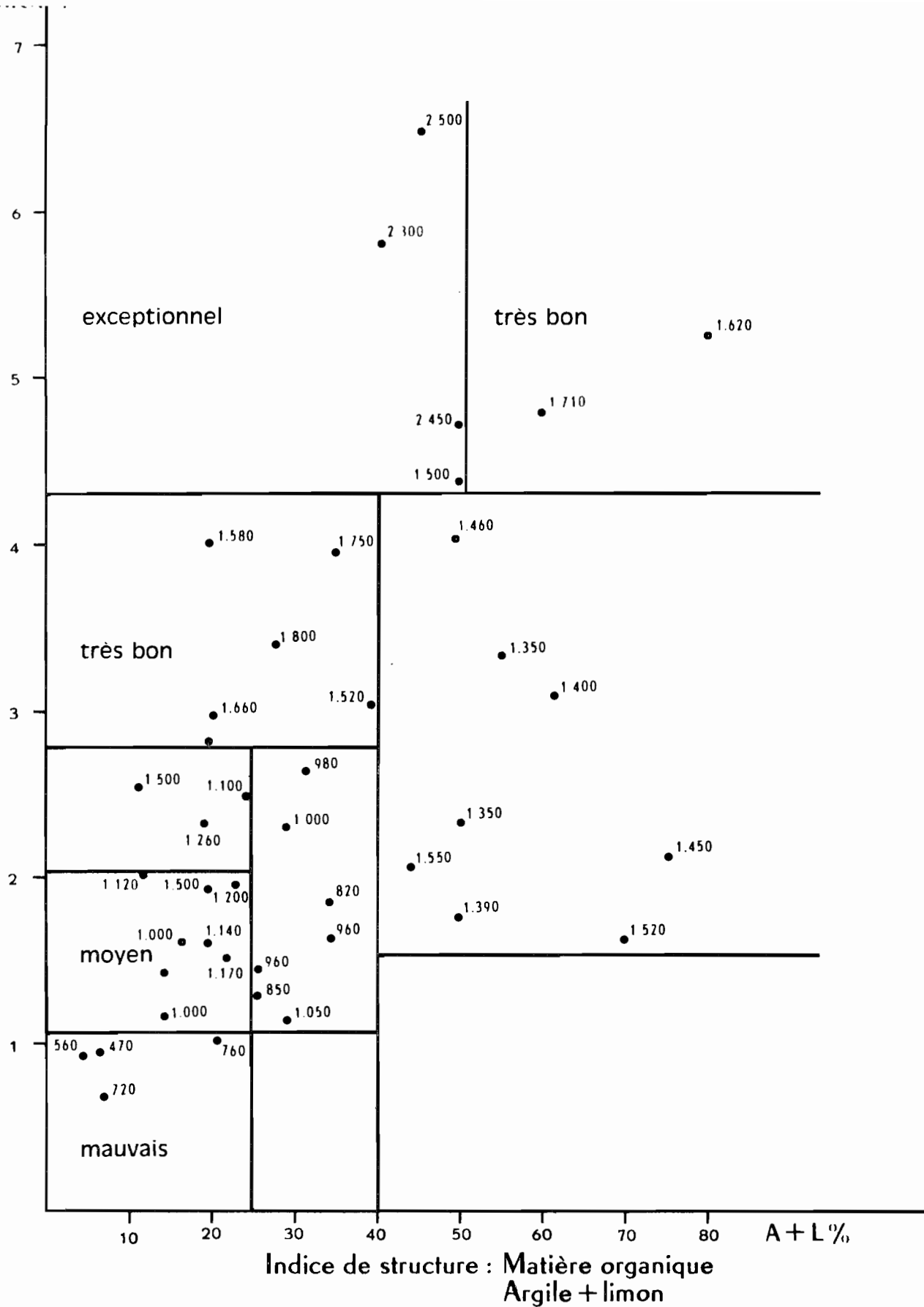


Fig. 22 - L'indice de structure en fonction de la matière organique , de la somme argile + limon dans des horizons de surface non gravillonnaire.

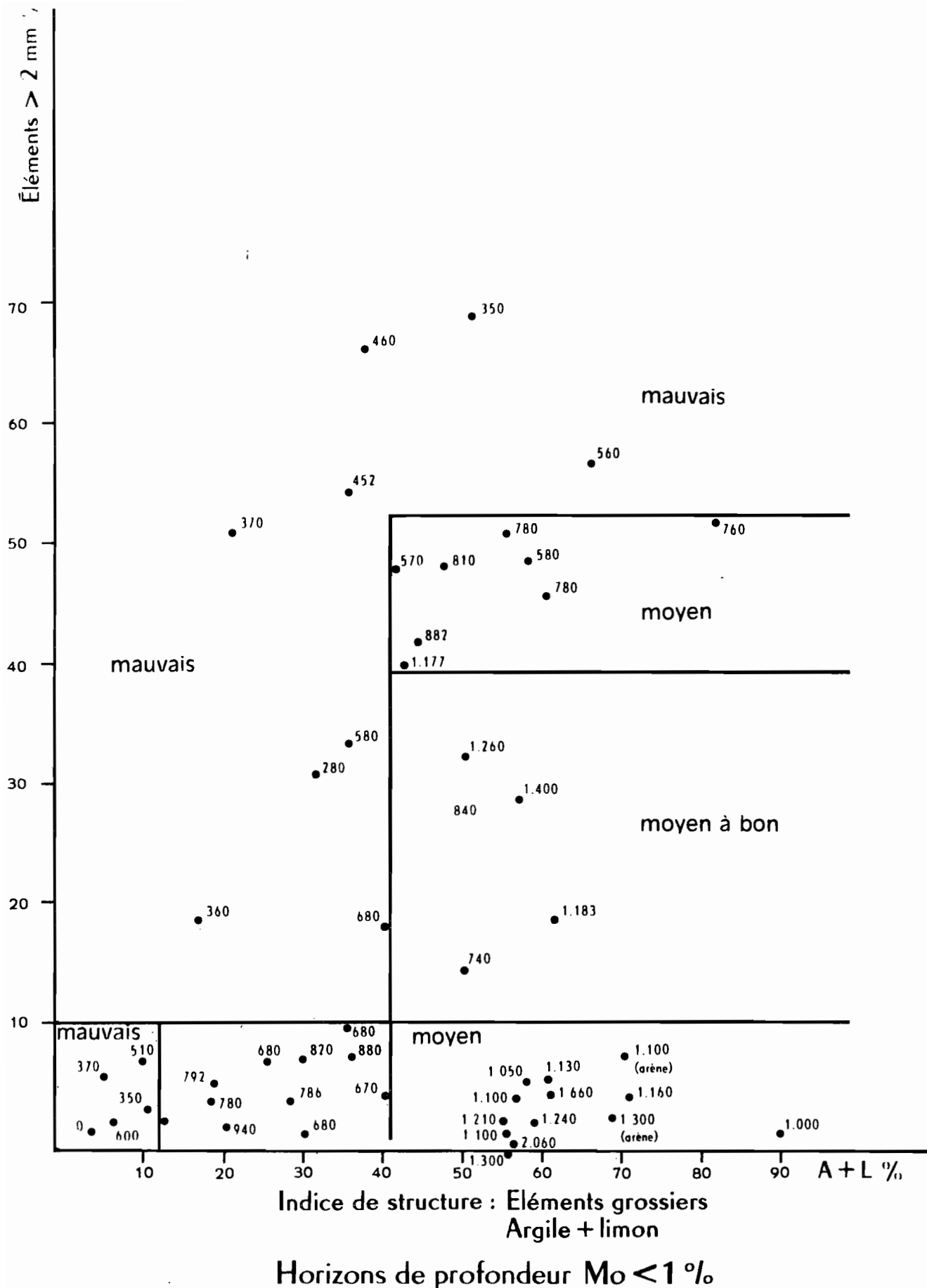


Fig. 23 - L'indice de structure en fonction des éléments grossiers et de la somme argile + limon dans les horizons de profondeur.

Lorsque la matière organique décroît en surface sous l'influence de la culture et de l'érosion, l'indice de structure s'abaisse considérablement .

Les indices de structure bas ont été observés dans des sols de savane dégradés, quelle que soit leur richesse en argile. Néanmoins, parmi ces sols, les plus sableux sont les plus pauvres, ainsi que ceux riches en graviers. Enfin, les terres sodiques (sols à alcalis) ont des indices de structure très bas, la porosité utile et surtout la rétention d'eau peuvent être très élevées, mais la stabilité structurale est quasiment nulle. La capacité pour l'air est également très basse .

9.3.3.3. Structure et travail du sol.

Lorsque le sol atteint un état d'équilibre fonction de sa granulométrie, de sa richesse chimique et de l'action de certains agents extérieurs, comme la pluie, il peut exister une bonne corrélation entre l'état structural et la nature intrinsèque du sol. L'homme par son travail peut modifier cet état structural en augmentant par exemple la valeur de la porosité par le labour; le sol tendra plus ou moins rapidement à retrouver son état initial, compte tenu de la stabilité structurale et de l'intensité des actions de destruction auxquelles il sera soumis .

Le cas du Riz est particulier, c'est une plante inondée qui préfère les sols à texture fine, et à structure compacte au moins à faible profondeur.

Aucune des caractéristiques indiquées ci-dessus n'est absolue, toutes les plantes jouissent d'une certaine plasticité et leur réussite dépend d'un ensemble de facteurs qui réagissent les uns sur les autres avec des possibilités de compensation (climat, richesse chimique, porosité, profondeur). Néanmoins, le tableau⁸, ainsi que le précédent, permettent un classement des cultures au point de vue de leurs exigences physiques minima et peut guider leur adaptation à des milieux divers ;

L'expérience montre que certains sols à structure assez mauvaise peuvent néanmoins être cultivés avec succès après l'action d'un labour ou d'un sous-solage. C'est le cas de certains

sub
sols bruns/arides argileux, ou de vertisols, ou de certains sols alcalisés, en particulier pour la culture cotonnière .

Exemples : sols " Dian " du Delta Central Nigérien (bruns arides), " Hardés " du Nord-Cameroun (Solonetz solodisés), Terres noires du Togo (vertisols).

Le labour de ces sols permet la pénétration des racines et de l'eau, et par voie de conséquence un phénomène de gonflement et de retrait qui provoque l'apparition de fentes sectionnant l'édifice compact existant naturellement. Une précaution essentielle est d'éviter l'excès d'eau sur ces sols qui ont alors vite fait de s'effondrer et de se refermer . Un inconvénient est la trop grande énergie mécanique à déployer pour leur travail en saison sèche, ainsi que leur état boueux en saison des pluies, mais la culture peut les améliorer à la longue, en facilitant l'élimination de l'ion ^{sodium} qui les rend instables (les amendements calcaires accélèrent cette amélioration ainsi que les matières organiques).

De même dans les sols hydromorphes, le travail crée un état structural qui n'existait pas naturellement .

Dans les régions de plus en plus humides, le travail du sol devient de plus en plus délicat en raison de la diminution d'épaisseur de l'horizon humifère superficiel . Dans les sols ferrugineux tropicaux, ce travail est encore possible sur environ 15 cm avec nécessité de rompre la semelle de labour ou d'empêcher sa formation par l'enfouissement de fumier ou de matières organiques diverses .

Dans les sols ferrallitiques, le labour ne peut plus être que très superficiel (5 cm) car les horizons immédiatement sous-jacents sont souvent presque stériles (très peu de matière organique et forte acidité) dans l'établissement de plantations arbustives: sous forêt, il est même préférable de ne pas toucher du tout à la surface du sol . L'enfouissement des matières organiques doit se faire par des pulvérisages légers ou des systèmes mélangeurs comme les " rotavators " .

L'indice de structure reste donc surtout un moyen pratique de classement des sols. Il permet de prévoir l'importance

des techniques d'amélioration à mettre en oeuvre, et également de mesurer l'action de ces améliorations sur la structure intrinsèque du sol .

9.3.3.4 Structure et profondeur d'enracinement .

En ce qui concerne l'utilisation au sol par les plantes, il faut tenir compte de leur système racinaire . Un horizon très compact ou caillouteux, ou trop humide à faible profondeur peut constituer un obstacle plus ou moins important suivant les cas . Pour une même fertilité, l'épaisseur de la couche explorée peut dépendre également de sa richesse chimique ou de sa capacité de rétention d'eau .

Il est donné ici quelques indications complémentaires pour les cultures déjà signalées précédemment .

PROFONDEUR D'ENRACINEMENT
TEXTURE ET STRUCTURE DES DIFFÉRENTES CULTURES (1)
Tableau 8-

Culture	Système racinaire	Profondeur minimum du sol utilisables	Eléments grossiers maximum	Texture	Structure	Observations
Caféier	fasciculé à pivot très court	0 m 70	40 à 50% de gravillons en sol argilo-sableux entre 0,30 et 0,80 m	moyenne sableuse ou argilo-sableuse préférable en surface	grumeleuse à polyédrique fine en surface, polyédrique nette en profondeur	sols de côtes bien drainés
Cacaoyer	plante à pivot profond et système superficiel	plus de 1 m utilisable	30% de gravillons en sols argilo-sableux en climat humide, 10% en climat limite	plutôt fine dépend de la pluviométrie	bonne en surface peut être fondue en profondeur	sols de bas de pente ou de plateau à bonne rétention .
Bananier	rhizome à faible profondeur d'enracinement variable	au moins 0,3 m davantage si possible	gravillonne ment indifférent au-dessous de 0,30 m. ou nappe entre 0,40 et 1 m.	moyenne à fine limoneux sableux argilo-organique	très bonne en surface grumeleuse porosité élevée	sols de bas de pente ou de bas-fonds drainés plateaux avec arrosage .

PROFONDEUR D' ENRACINEMENT,

TEXTURE ET STRUCTURE DES DIFFERENTES CULTURES (2)

Tableau 8 .

Culture	Système radicu- laire	Profondeur minimum du sol utilisable	Eléments grossiers maximum	Texture	Structure	Observations
Palmier à Huile	fascicu- lé den- se et profond	au moins 1 m sans horizon compact	gravillon- nement fai- ble 15% dans les régions humides	sableuse, sablo-li- moneuse friable	très meuble particulière- ment grumeleuse polyédrique fine	sol de pla- teau ou de pente en région hu- mide bas de pente bien drainés
Hévéa	pivotant et traçant	1 m à 1,50 m utilisable	30% maxi- mum en sol argi- lo sableux	très va- riée évi- ter les taux d'ar- gile ex- cessifs	assez meuble en surface polyédrique en profon- deur	plateau ou pente en ré- gions humi- des
Cocotier	fascicu- lé den- se et profond	1 m.	gravillon- nement fai- ble à nul	plutôt sa- bleuse li- moneuse ou sablo-argi- leuse si le sol est bien drai- né	très meuble	zones planes sableuses côtières ou plateaux bien drai- nés
Canne à sucre	traçant et fas- ciculé racines d'ancra- ge pro- fondes	0,70 à 1 m.	gravillon- nement fai- ble à nul	plutôt fine, li- moneuse, limono- argileuse, argileuse	assez bonne en surface fondue en profondeur	zones pla- nes ou allu- viales bien drainées .

PROFONDEUR D'ENRACINEMENT

TEXTURE ET STRUCTURE DES DIFFERENTES CULTURES (3)

Tableau 8.

Culture	Système radicu- laire	Profondeur minimum du sol utili- sable	Eléments grossiers maximum	Texture	Structure	Observations
Maïs	fascicu- lé peu profond	0,30 m au moins en sol ferti- le	gravillon nement in- différent au-dessous de 0,3 m	variable plutôt fine	Très bonne en surface médiocre en profondeur	positions va- riées plateaux pentes et bas-fonds
Manioc	grosses racines (tuber- cules)	0,50 à 0,75 m.	faible à nul	sableuse, sabli- moneuse sabli-ar- gileuse	meuble, grumeleuse, particu- laire, poly- édrique	plateaux ou pentes
Igname	gros tubercule	0,50 m	faible à nul	sabli- moneuse, sabli ar- gileuse	meuble	plateaux ou pentes, but- tes élevées dans les bas de pentes
Coton	pivotant et branchu	0,50 à 0,75 m	faible à moyen en pro- fondeur	sabli-ar- gileuse à argileu- se	compacité moyenne po- lyédrique	plateaux ou plaines bien drainées.

PROFONDEUR D'ENRACINEMENT,
TEXTURE ET STRUCTURE DES DIFFERENTES CULTURES (4)

Culture	Système radiculaire	Profondeur minimum du sol utilisable	Eléments grossiers maximum	Texture	Structure	Observations
Sorgho	fasciculé peu profond	0,30 à 0,50 m	indifférent au-dessus de 0,30	sablo-ar-gileux, limoneux, argilo-sableux	compacité moyenne à forte	plateaux ou plaines moyennement drainés
Mil	fasciculé	variable	faible	sableuse sablo-limoneuse	meuble particulière, grumeleuse	plateaux ou pentes
Arachide	fasciculé peu profond	0,30 m		sableuse, sablo-limoneuse	très meuble, grumeleuse ou particulaire	plateaux ou pentes

9.4 CONCLUSIONS .

Dans les régions tropicales ou les régions arides, le choix des terres pour la culture est d'une grande importance, et dépend principalement de leurs propriétés physiques auxquelles les plantes doivent être adaptées de même qu'au climat .

Dans ces pays, les propriétés physiques peuvent être considérées comme des facteurs peu modifiables dans l'état actuel des techniques. Ces propriétés sont souvent le résultat d'un équilibre entre la composition intrinsèque du sol et les conditions extérieures, climat en particulier; elles peuvent être mesurées par des techniques de laboratoire permettant le calcul d'indices de structure servant au classement des sols .

L'homme peut améliorer les propriétés par l'irrigation, le drainage, le travail du sol, les plantes de couverture, parfois les amendements. Ces techniques sont souvent d'une application plus délicate qu'en pays tempérés. Elles doivent tenir compte du mode d'évolution naturel du sol .

C h a p i t r e 1 0

ETUDE DES FACTEURS DE LA FERTILITE DES SOLS

B. LES FACTEURS CHIMIQUES

INTRODUCTION

1. LA MATIERE ORGANIQUE DANS LES SOLS TROPICAUX .

1.1. Introduction

1.2. Variation du taux de matière organique dans les sols tropicaux.

1.3. Quelques exemples.

1.4. Le problème de l'azote minéral.

2. LE PHOSPHORE DANS LES SOLS TROPICAUX.

2.1. Introduction, analyse.

2.2. Le Phosphore total.

2.3. Le Phosphore assimilable .

3. LES BASES ECHANGEABLES DANS LES SOLS TROPICAUX.

3.1. Introduction, analyse .

3.2. Généralités sur le complexe absorbant .

3.3. Action des bases .

3.4. Les sols calcaires.

3.5. Les sols salés et les sols à alcalis.

4. CONCLUSIONS.

5. BIBLIOGRAPHIE .

INTRODUCTION.

L'analyse chimique des sols est utilisée par les pédologues pour préciser les bases de la classification des sols, mais également pour caractériser un ensemble de propriétés qui agissent directement ou indirectement sur la croissance des plantes .

En ce qui concerne le choix des fertilisants, d'autres techniques sont préconisées : analyses des végétaux, diagnostic foliaire , essais en pots, essais aux champs . Ces techniques ne doivent pas être opposées mais plutôt associées, les unes étant le complément indispensable des autres, pour parvenir à un résultat précis .

Le principal intérêt de l'analyse des sols est de donner, par un test relativement rapide sur un échantillon prélevé à un moment quelconque de l'année, avec ou sans culture, des renseignements fondamentaux sur la nature du milieu qui doit servir à l'alimentation des plantes .

La difficulté réside dans le choix des techniques analytiques et dans le fait que chaque résultat d'analyse doit faire l'objet d'une interprétation en fonction de la méthode utilisée, du type de culture, du type de sol, du climat, etc .

Il n'existe pas de recette simple d'interprétation; néanmoins, il semble possible d'énoncer quelques règles générales qui serviront de guide à l'interprétation. On devra par ailleurs faire appel à son jugement et à son expérience pour adapter les solutions générales aux problèmes particuliers de chaque région et de chaque sol .

I. LA MATIERE ORGANIQUE DANS LES SOLS TROPICAUX.

I.I. Comparaison entre la matière organique des sols tempérés et la matière organique des sols tropicaux.

Dans les sols des régions tempérés, les agronomes ont constaté une grande stabilité du taux de matière organique des sols; ce n'est qu'après de nombreuses années de culture sans fumure organique que des diminutions sensibles des taux de carbone et d'azote ont été décelées.

Si le maintien d'un stock minimum de matière organique reste une préoccupation surtout en ce qui concerne la structure physique des sols, dans l'immédiat, le travail du sol, ainsi que des apports massifs d'engrais minéraux en particulier d'engrais azotés, suffisent généralement à maintenir les rendements des récoltes à un niveau élevé .

Sur le plan agronomique, une teneur élevée en carbone n'indique pas toujours un sol fertile, mais plutôt un sol où les conditions de transformation de la matière organique sont difficiles (sols acides, sols trop humides, etc.). Quant à l'azote, la fourniture de cet élément aux plantes dépend beaucoup plus des conditions de minéralisation (fonction de la température, de l'humidité, de la nature du sol) que du stock global sous forme organique .

Dans les sols tropicaux, le problème se pose différemment, bien qu'il y ait lieu de distinguer les sols des régions sèches des sols des régions humides . Dans les classes des sols isohumiques, des sols à sesquioxides, des vertisols, ainsi que des sols hydromorphes minéraux, l'humification des matières organiques est rapide; seuls certains sols hydromorphes organiques possèdent des matières organiques grossières à C/N élevé, mais qui sont néanmoins susceptibles d'évoluer après drainage et chaulage du sol . L'humus des sols tropicaux possède une certaine stabilité, néanmoins, la minéralisation de l'azote est toujours assez rapide et dépend surtout, comme il sera montré plus loin, des conditions d'humidité du sol et du pH .

D'autre part, certains facteurs influent sur le taux d'humus : soit mauvaises conditions d'accumulation (climat trop sec, absence de végétation, sol trop sableux), soit destruction rapide de l'humus (entraînement par érosion). Ces facteurs peuvent amener des variations très importantes du taux d'azote total dans les sols . Donc, puisque la minéralisation est rapide et que le stock peut être très variable, l'importance du stock d'azote total joue un rôle important dans la fertilité, c'est donc là une différence essentielle avec les pays tempérés; et de très nombreux dosages d'azote total dans des sols de fertilité connue ont montré l'importance de cette mesure dans les diagnostics de fertilité .

La matière organique n'agit pas seulement comme source d'azote, il a déjà été montré son importance dans les problèmes de structure et de rapports eau et sol. Par ailleurs dans les sols où les colloïdes minéraux font défaut ou n'ont qu'une très faible capacité d'échange de bases (cas des sols à kaolinite), la matière organique est le principal constituant permettant la fixation des bases (capacité d'échange 300 mé pour 100 g), et il semble ainsi que le phosphore total et assimilable, soit lié en grande partie à la matière organique. Pour toutes ces raisons et d'autres encore, la matière organique des sols tropicaux est un facteur essentiel de leur fertilité chimique .

. Taux d'équilibre de l'humus .

Est-il nécessaire dans ces conditions de vouloir à tout prix augmenter le stock d'humus des sols, la réponse est très variable suivant les cas .

Dans la plupart des sols vierges sous végétation naturelle non dégradée steppe, savane, forêt, prairie marécageuse, il existe un taux de matière organique que l'on peut considérer comme taux d'équilibre qui est extrêmement variable suivant les types de sol. Il correspond assez généralement à de bonnes propriétés du sol. La mise en culture provoque souvent une diminution rapide du taux de matière organique, et il est alors nécessaire de prendre des mesures de conservation et d'amélioration du stock d'humus, dans d'autres cas, le taux de l'humus reste très stable malgré la mise en culture .

Dans tous les cas, l'expérience montre qu'il est très difficile par une fertilisation organique de dépasser le taux d'équilibre, c'est donc lui qui doit servir de base pour la fertilisation organique. Il est important de conserver ou d'atteindre ce taux d'équilibre, il est vain de vouloir le dépasser .

En plus de la quantité d'humus déterminée par les dosages de carbone et d'azote du rapport C/N ou même des colloïdes humiques totaux, il semble exister aussi un problème de qualité.

. Qualité de l'humus .

Actuellement, il n'existe que peu de méthodes pour juger la qualité de l'humus . La richesse en bases et en phosphore par

rapport à la quantité d'azote et les proportions relatives en acide humique et acide fulvique ainsi que les fractions acides humiques gris, intermédiaires et bruns semblent être en relation avec la qualité de l'humus au point de vue fertilité .

Si le taux de matière organique sous végétation naturelle non dégradée semble représenter un optimum du point de vue quantitatif, il ne représente pas toujours l'optimum qualitatif qui peut être très largement amélioré par des enrichissements en éléments minéraux (phosphore, calcium, magnésium) surtout dans les sols lessivés ou les sols formés sur roches acides et pauvres. La fertilisation minérale est donc le complément indispensable de la conservation du stock organique d'équilibre .

1.2. Variations du taux de matière organique dans les sols tropicaux.

Régions semi-arides, 400 à 600 mm de pluie annuelle.
(Longue saison sèche, 9 mois, courte saison des pluies, 3 mois).

Dans les régions semi-arides, les taux de matière organique des sols sont généralement très bas; ils sont de 0,3 à 0,4% dans les sols sableux (ferrugineux tropicaux non lessivés) et d'environ 1% dans les sols argileux(sols bruns argileux, vertisols). Les taux d'azote total varient de 0,02 à 0,04 %. Cette matière organique est assez bien répartie et assez constante sur environ 0,50 m de profondeur .

La mise en culture ne diminue que très faiblement le taux de matière organique du sol (sauf érosion éolienne dans les sols sableux). L'apport d'amendements organiques (engrais verts) n'améliore que très faiblement le taux de matière organique (le résidu humifié stable d'une matière organique enfouie n'est que de 11% de la quantité introduite, il peut passer à 20% avec apport d'engrais azotés).

Malgré les taux de matière organique et d'azote très bas, certains sols vierges sortant de longue jachère peuvent être fertiles : 1500 à 3000 kg d'arachide dans les sols sableux, 1500 à 3000 kg de coton-graine dans les sols argileux . Cette fertilité est due vraisemblablement à une activité biologique intense

pendant la courte saison des pluies, et elle dépend considérablement du pH du sol, la fertilité est en relation avec la vitesse de nitrification et la fixation d'azote atmosphérique. Dans ces sols, la fertilité est très bonne vers le pH 7 et devient rapidement très mauvaise au-dessous du pH 6. Les sols des régions arides réagissent très généralement aux engrais azotés; les engrais phosphatés ont des réactions variables, fonction de la richesse en phosphore des sols. Les sols des régions arides réagissent très généralement aux engrais azotés, les engrais phosphatés ont des réactions variables, fonction de la richesse en phosphore des sols.

Une conséquence de la pauvreté en matière organique est la mauvaise structure des sols, surtout les sols argileux, ces sols sont souvent très compacts et présentent de larges fentes de retrait en saison sèche, en période des pluies ou sous irrigation, les terres sont battantes et imperméables (culture du coton dans les sols alluviaux). Cette structure peut être améliorée provisoirement par le travail du sol qui nécessite une forte dépense d'énergie. L'augmentation de la teneur en calcium échangeable peut permettre le développement d'une structure polyédrique fine en surface qui améliore la perméabilité et les conditions de travail du sol.

Le repos sous jachère où les engrais verts peuvent avoir une action favorable sur la porosité du sol et l'enracinement même, s'ils n'augmentent pas ou peu le stock organique, les engrais verts jouent un rôle important dans les sols sableux. Ils protègent le sol contre l'érosion et améliorent le profil cultural et l'enracinement (culture arachidière) de même les feuilles de Faidherbia albida augmentent fortement les rendements.

Régions semi-humides, 600 à 1200mm de pluie annuelle.
(5 à 7 mois de saison sèche).

Cette zone climatique correspond aux sols ferrugineux tropicaux plus ou moins lessivés et à la limite des sols faiblement ferrallitiques, on y observe également des vertisols, des sols hydromorphes, etc.

La matière organique qui provient des racines des grandes graminées est encore assez bien répartie en profondeur, elle est à peu près constante entre 0 et 20 cm, mais diminue de moitié entre 20 et 40 cm, puis progressivement au-dessous.

Les taux sont extrêmement variables suivant le type de sol; la teneur en éléments fins et le pH influent considérablement sur le taux de matière organique (0-15 cm). Entre 10% et 60% d' (Argile + limon), le taux de matière organique varie de 1% à 3,5% à pH = 6 et de 2 à 5 % à pH=7.

FORESTIER (1959) fait intervenir le rapport $\frac{S^2}{A + L}$

où S = Somme des bases mé . 100 g.

A + L = (Argile + limon) %.

Lorsque ce rapport est constant, le taux de matière organique croît proportionnellement au taux de (A + L).

Pour une certaine valeur de (A + L), le taux de matière organique croît avec le rapport $\frac{S^2}{A + L}$ (par exemple, pour des valeurs moyennes 25% A + L, la matière organique passe de 1,5% à plus de 3% lorsque $\frac{S^2}{A + L}$ passe de 0,5 à 1,2).

Ces règles donnent une valeur chiffrée approximative à l'action des " stabilisateurs d'humus " qui sont des colloïdes minéraux et des cations comme le calcium, permettant une meilleure fixation de l'humus sur l'argile .

Il faut tenir compte en outre, dans les sols tropicaux, de la résistance accrue à l'érosion offerte par des agrégats stables, argileux et humifères et bien saturés en ion Calcium .

Evolution de la matière organique par la culture : Dans un sol de savane de la République Centrafricaine la perte de matière organique dans un sol protégé contre l'érosion est d'environ 20% en 3 ans . Si le sol est soumis à l'érosion, cette perte de 20% peut avoir lieu en un an .

Si la jachère se reconstitue rapidement, la régénération du sol peut être rapide : un à deux ans. Si le sol est appauvri et que la jachère ne se reconstitue que lentement, laissant l'érosion poursuivre son action, la régénération peut être très lente : 10 ans .

Si l'on conjugue la protection antiérosive et une fertilisation organique et minérale, il est possible de maintenir le taux de matière organique du sol avec des jachères réduites.

	Culture du coton				Sommes des bases échangeables	
	C%	N%	P ₂ O ₅ %	pH	S.mé. p.100 g.	
. Sols sous culture récente non améliorés (coton 1500 Kg/ha).....	0,895	0,083	0,44	6,3	6,46	
. Sols améliorés par 20 années de Fumier (de ferme (Coton 3000 Kg/ha))	1,167	0,077	1,83	6,5	9,17	
	1,17	0,11	2,11	6,8	12,85	
. Sols érodés (rendements en coton médiocres)	0,489	0,052	0,32	6,1	2,43	

Tableau 9. Chiffres obtenus à la Station I.R.C.T. de Bouaké (Côte d'Ivoire) sur sols ferrugineux tropical lessivé où 25% (A + L) sur 0-20cm.

Comme il est possible de le constater, les sols recevant de très fortes fumures organiques et cultivés d'une façon à peu près continue conservent leur taux de matière organique à peu près constant et voisin d'un taux d'équilibre (sol sous culture récente . Par contre, les observations de terrain montrent dans les sols améliorés un horizon humifère d'une couleur noire plus foncée, avec une meilleure structure que dans le sol non amélioré. Cet aspect différent de l'humus ne se manifeste pas sur le taux de carbone et d'azote .

En revanche, on note un accroissement considérable du phosphore total multiplié 4 à 5 fois et du taux de bases environ doublé . Le pH présente également une augmentation sensible, le rendement en coton est doublé. Dans ce cas, intervient certainement une amélioration de la qualité de l'humus qui se manifeste ici par des rapports plus élevés $\frac{P_2O_5}{N}$ et $\frac{S}{N}$.

Sols ferrallitiques faiblement désaturés

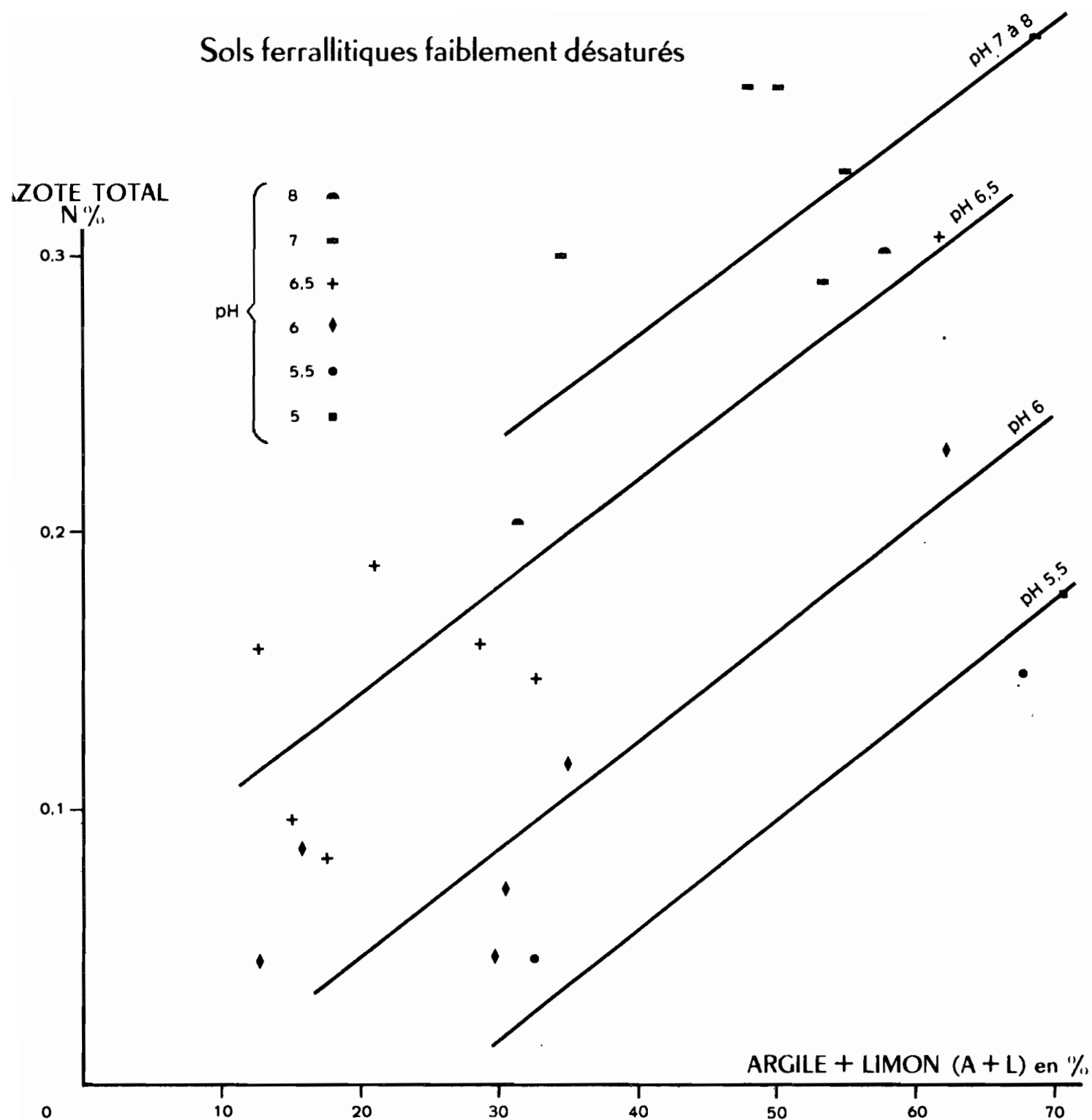


fig. 24 - Relation entre la teneur en azote total, argile, limon, le pH dans les sols ferrallitiques faiblement désaturés.

Sols ferrallitiques moyennement désaturés

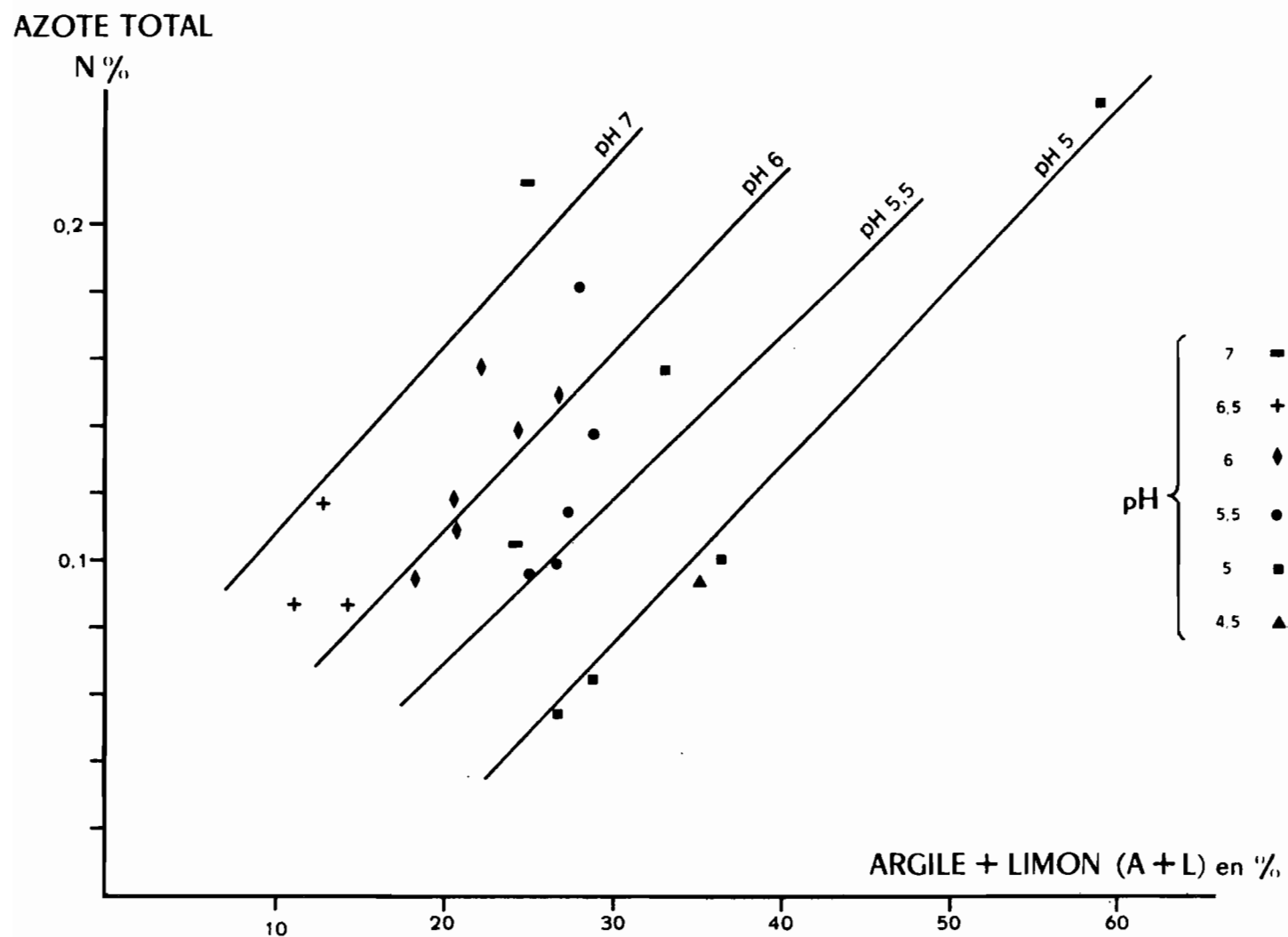


Fig. 25 - Relation entre la teneur en azote, la teneur en argile + limon, le pH dans les sols ferrallitiques moyennement désaturés.

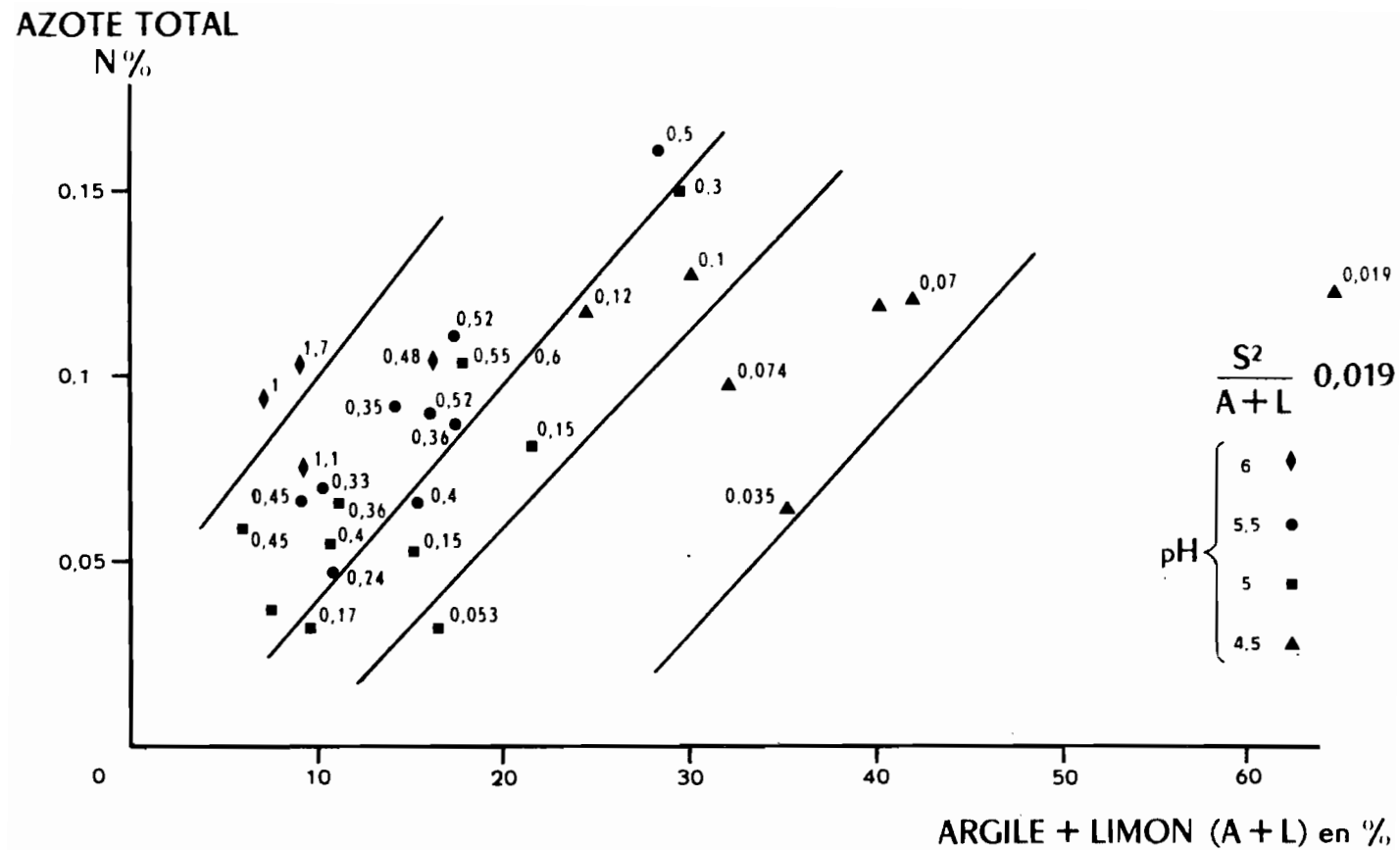


Fig. 26 - Relation entre la teneur en azote, la teneur en argile + limon, le pH dans les sols ferrallitiques fortement désaturés.

Dans certains sols de République Centrafricaine on a noté une diminution de stabilité structurale dans des sols aux taux de carbone à peu près constants. Cette diminution semble correspondre à un accroissement du rapport $\frac{\text{Acides fulviques}}{\text{Acides humiques}}$ et également à l'accroissement du rapport .

$$Y = \frac{\text{Acides humiques bruns} + \text{acides humiques intermédiaires}}{\text{acides humiques gris}}$$

$$Y = 38,69 + 3,6 I_s \quad (\text{où } I_s : \text{Indice d'instabilité HENIN})$$

Dans les sols érodés de Bouaké où le rendement en coton est médiocre, les taux de carbone et d'azote sont diminués environ de moitié, les taux de phosphore et de bases sont faibles, le pH s'est acidifié . D'après les études de B. DABIN confirmées par les observations de J.M. BERGER (1964) pour obtenir de bonnes récoltes dans ces sols, le taux d'azote total ne doit pas descendre en-dessous de 0,8%, le taux de phosphore total ne doit pas descendre au-dessous de 0,7% et le pH doit se situer entre 6 et 6,5.

Dans ces régions où la pluviométrie reste assez limite, les normes d'interprétation doivent être plus sévères que dans le cas des sols irrigués. Ces normes d'interprétation varient en fonction des types de sol, des indications plus complètes seront données plus loin .

Les sols des régions humides, 1200 à 2000 mm de pluie.

Ces sols se trouvent généralement sous végétation forestière qui apporte environ 10 tonnes de matière organique par ha et par an; cette matière organique se décompose très rapidement , il n'y a que très peu de débris végétaux à la surface du sol, même sous forêt dense le sol est souvent nu. L'épaisseur de l'horizon humifère diminue au fur et à mesure que l'on se retrouve sous une pluviométrie plus élevée. En moyenne, la plus grande partie de la matière organique se trouve entre 0 et 5 cm, entre 5 et 10 cm, elle tombe à la moitié de la teneur superficielle, entre 10 et 20 cm, environ au 1/3, et au-dessous de 20 cm, la diminution est très rapide .

Les prélèvements moyens de surface doivent donc être effectués entre 0 et 10 cm. Comme dans le cas des sols de savane, le taux de matière organique en surface peut varier de 1 à 6% et

même davantage en fonction du taux d'argile + limon, et du pH, c'est-à-dire de la structure en bases du complexe absorbant; il est possible également d'utiliser l'indice de FORESTIER $\frac{S^2}{A + L}$ en corrélation avec le taux de matière organique .

Trois graphiques figurent dans le texte, représentant les variations du taux d'azote total dans l'horizon superficiel (0-10 cm) des sols ferrallitiques de Côte d'Ivoire, en fonction du taux d' (Argile + Limon) et du pH (Fig. 24, 25, 26).

- Sols ferrallitiques très désaturés, où les taux de N varient de 0,05% à 0,15% avec des pH variant de 4,5 à 6.
- Sols ferrallitiques moyennement désaturés où les taux de N varient de 0,05 % à 0,2% avec des pH variant de 4,5 à 7.
- Sols ferrallitiques faiblement désaturés où les taux de N varient de 0,05 à 0,4 % avec des pH variant de 5 à 8.

Inversement, la somme S des bases échangeables est fonction du taux d'azote total proportionnel au taux de matière organique, qui dans ces sols devient l'élément essentiel permettant la fixation des bases, puisque l' argile de type kaolinique n'a qu'une capacité de fixation très faible (kaolinite = 10 mé . . 100 g. et matière organique = 300 mé . . 100 g.).

Les variations des taux de matière organique, bases échangeables ont été suivies en Côte d'Ivoire, sous divers types de culture. Les résultats sont présentés dans les tableaux N°

Evolution de la Matière organique sous culture dans les sols ferrallitiques très désaturés (sols sur sables tertiaires de basse Côte d'Ivoire)

		3 années d'expérience				Indice de structure	
		Terre érodée Kg/ha	MO %	N %	C/N	S mé	StxVPux Eu
	Forêt	2.800	2,85	0,151	11	1,4	1.350
culture	2 ans plante de couverture	77.540	2,5	0,099	14,8	0,3	1.100
	1 au Maïs						
Sol nu	3 ans	335.391	1,24	0,059	12,4	0,14	700

Tableau 10

—

MAUVAIS	MÉDIO	MOY	BON	TRÈS BON	CACAO CAFÉ BANANE etc.

S mé pour 100 g.

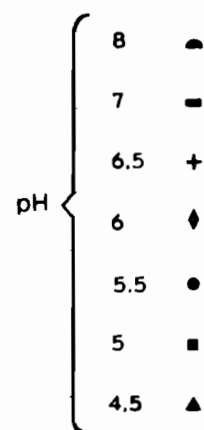


Fig. 27 - Relation entre la somme des bases échangeables, la teneur en azote total et le pH dans les sols ferrallitiques faiblement désaturés.

FERTILITE

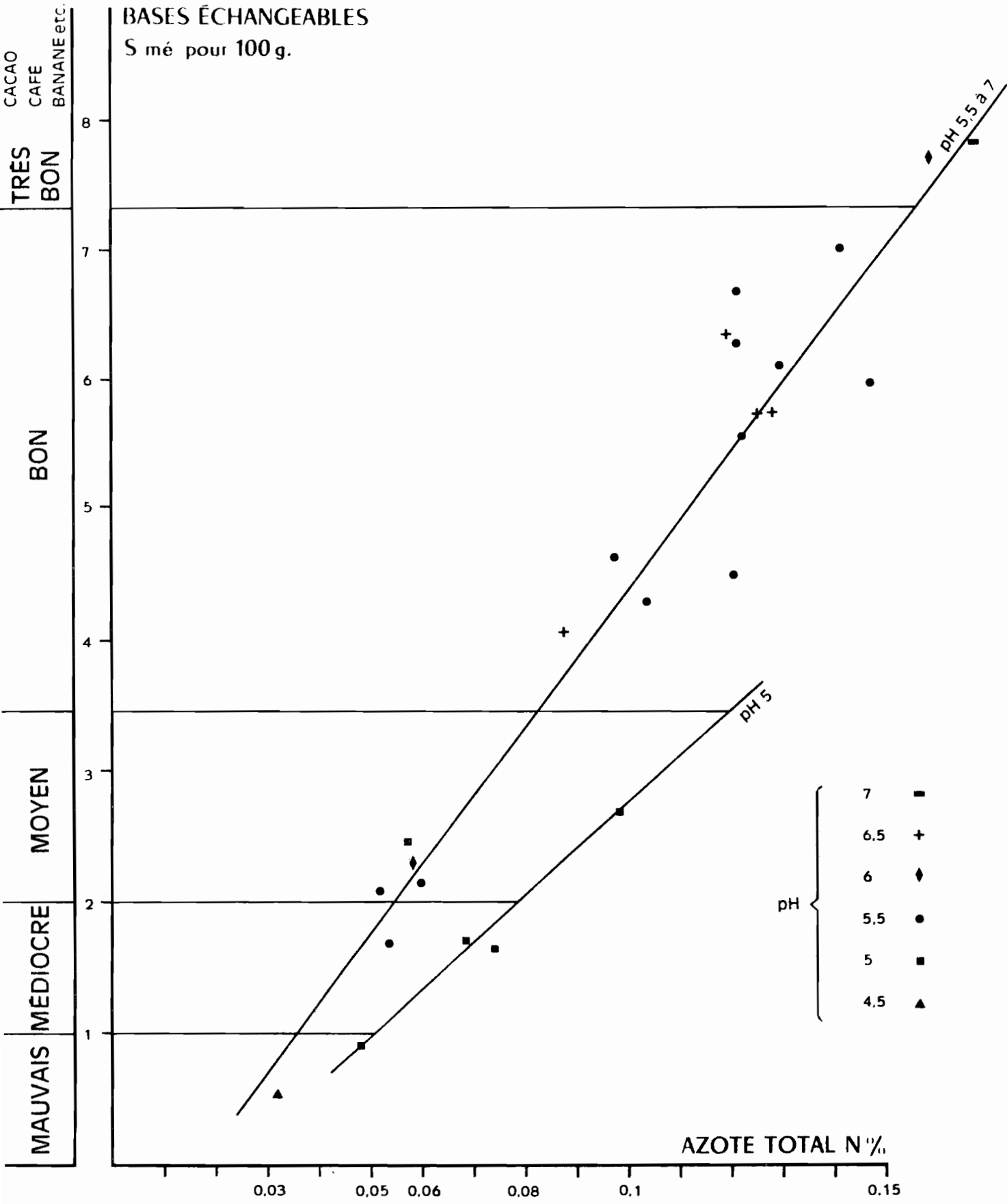


fig. 28 - Relation entre la somme des bases échangeables, la teneur en azote total et le pH dans les sols ferrallitiques moyennement désaturés.

Sols ferrallitiques très désaturés

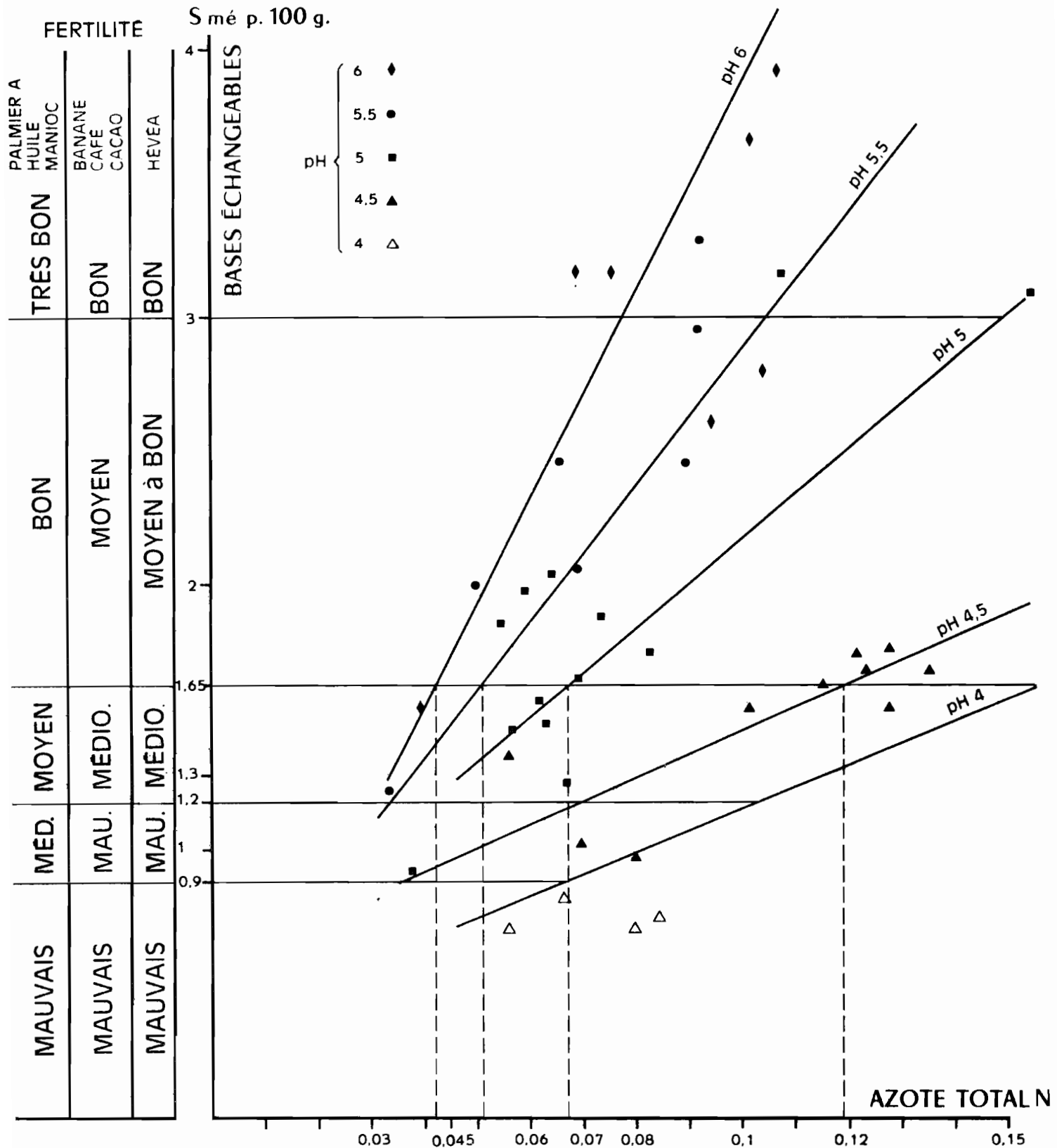


Fig. 29 - Relation entre la somme des bases échangeables, la teneur en azote total et le pH dans les sols ferrallitiques fortement désaturés.

	MO %	N %	C/N	S. mé.	Indice de Structure
1 an de culture	1,5	0,069	12,6	3,13	910
4 ans -	1,21	0,044	15,9	0,828	900
6 ans -	1,21	0,04	17	0,634	840
Régénération 4 ans Pennisetum purpureum	2,46	0,08	17,7	2,48	1.350

Tableau 11.

Culture industrielle d'Ananas (ONO)

- La perte de terre en sol nu est de près de 100 T par ha et par an.
- La perte de matière organique enttrois ans est de 50 à 75%, elle peut atteindre 50% dès la première année.
- La teneur en bases après trois ans varie de $\frac{1}{5}$ à $\frac{1}{10^e}$ du taux d'origine .
- Une culture protectrice (couverture de maïs) maintient à peu près le taux de carbone, mais il y a baisse du taux d'azote et des bases . Une jachère à Pennisetum purpureum pendant 4 ans redonne sensiblement la richesse du sol à l'origine .
- L'indice de structure varie dans le même sens que le taux de matière organique .

Essai de synthèse.

Sous un climat donné et dans un type de sol donné, on a constaté un accroissement de fertilité en fonction du taux de matière organique et d'azote, lorsque le $\frac{C}{N}$ est voisin de 10 à 12.

Mais si on veut établir une correspondance générale dans divers types de sols, il n'existe pas de relation simple entre taux d'azote et rendement . Le même rendement en coton (2000 kg/ha) peut s'obtenir avec 0,35 % et avec 3,5 % d'azote total, c'est-à-dire 10 fois plus . Par contre, il a été constaté que dans le premier cas, le pH était de 7, et dans le second cas le pH était de 5; à la suite de nombreuses observations tant en cli-

mat sec qu'en climat humide ou sous irrigation, quelques règles générales ont pu être établies .

Si l'on considère les intervalles suivants :

N‰	Matière organique %
0,1 à 0,25	0,17 à 0,43
0,25 à 0,45	0,43 à 0,76
0,45 à 0,8	0,76 à 1,35
0,8 à 1,5	1,35 à 2,55
1,5 à 3	2,5 à 5,1
3 à 6	5,1 à 10,1

En passant d'un intervalle à l'intervalle supérieur, on note un accroissement net de la fertilité, ceci pour la plupart des cultures.

La texture du sol doit cependant être moyenne (20 à 40% A + L) dans les cas des textures extrêmes: inférieure à 10% de A + L et supérieure à 50% de A + L. Il faut appliquer un facteur de correction, environ 25% en plus de rendement dans les cas des textures sableuses et 25% en moins environ dans le cas des textures argileuses .

Pour un même intervalle de teneur en matière organique, la fertilité des sols peut être équivalente si leur pH est équivalent; par contre si le pH augmente dans les limites de 4 à 7,5, la fertilité croît dans le même sens; pour un même pH, la fertilité croît avec la teneur en azote total .

On aboutit ainsi à une échelle générale de fertilité où N total et pH jouent un rôle compensateur l'un de l'autre (Fig. 30).

Ce rôle de compensation est dû vraisemblablement à l'action du pH sur l'activité biologique du sol, la vitesse de minéralisation de l'azote (ammonification, nitrification, etc) étant d'autant plus grande que le pH est plus proche de la neutralité , et d'autant plus faible que le pH est plus acide :

En réalité, ce n'est peut-être pas le seul facteur à invoquer, l'échelle de fertilité ci-jointe est entièrement empirique, les intervalles et les appréciations du niveau de fertilité (bon, moyen, médiocre, etc) proviennent d'observations réelles sur des cultures pratiquées dans des conditions convenables.

Échelle de Fertilité pH

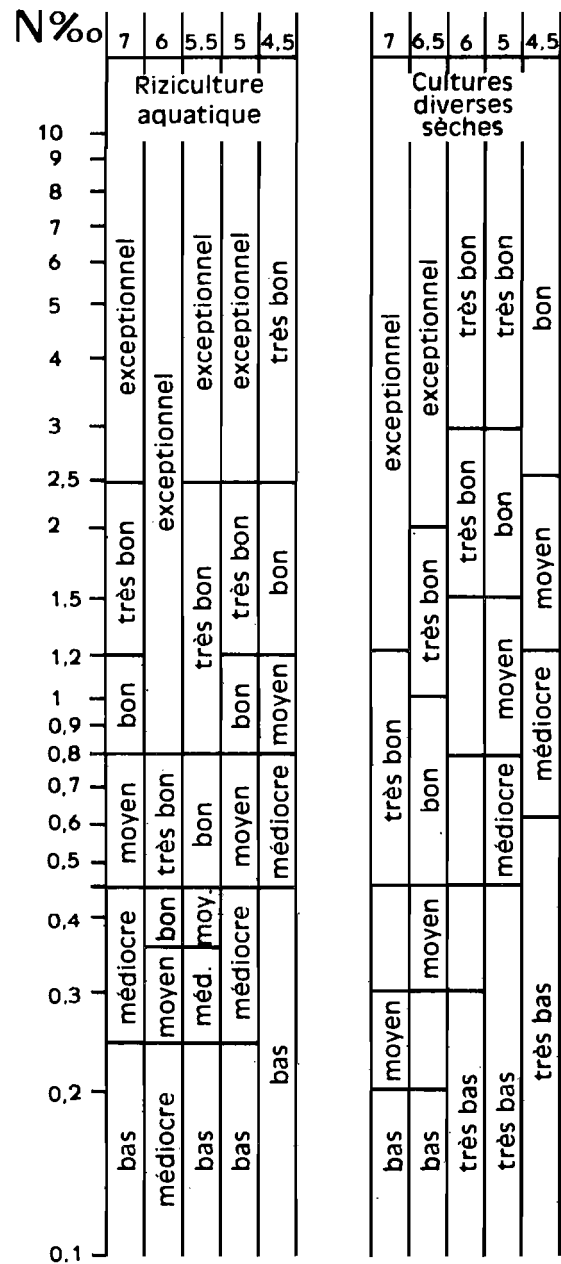


Fig. 30 - Échelle de fertilité pour diverses cultures en fonction de l'azote total et du pH.

1.3. Quelques exemples.

Culture du coton irrigué dans les sols de régions semi-arides (500 mm de pluie)

Tableau 12

Type de sol	N‰	pH	rendement Kg/ha - coton/graine
Sol hydromorphe moyennement humifère sur alluvions (Niger)	2,9	4,38	1500
Vertisol du Delta Central Nigérien (Mali)	0,35	7	1700
sub Sol brun/aride argileux (DCN (Mali))	0,38	6,5	1400
sub Sol brun/aride argileux	0,24	6,7	1100
sub Sol brun/aride argileux	0,39	6,2	950
Sol ferrugineux tropical peu lessivé beige - limoneux (DCN-Mali)	0,25	6,2	890
Sol ferrugineux tropical peu lessivé ocre-argileux (DCN-Mali)	0,44	5,4	350

Dans les conditions de culture irriguée existant à l'époque des prélèvements ci-dessus, un rendement de 1500 kg était considéré comme moyen. Pour un taux d'azote total d'environ 0,35‰, l'action du pH sur le rendement peut être établie comme suit :

pH	5	5,5	6	6,5	7
Indice de rendement	200	500	1000	1500	2000
Appréciation	très mauvais	mauvais	médiocre	moyen	bon

Dans les conditions de culture non irriguée, un rendement " moyen " peut se situer à un niveau plus bas .

Tableau 13.

Culture du Coton non irrigué en région semi-humide, 1200 mm de pluie sols ferrugineux tropicaux lessivés (Bouaké, (Côte d'Ivoire).

N‰	pH	rendement coton kg/ha	appréciation
0,5	6	1000	moyen à médiocre
0,43	6,5	1500	moyen à bon
0,9	6,5	2000	bon à très bon
0,9	6,5	2500	bon à très bon
1	7	3000	très bon à exceptionnel

Tous les chiffres ci-dessus sont obtenus dans d'excellentes conditions culturales (stations expérimentales), car le rendement en coton peut varier considérablement en fonction des traitements anti-parasitaires et des techniques culturales .

Culture du Manioc en région semi-humide, 800 mm de pluie .

Tableau 14 : Anecho (Sud-Togo). Sol faiblement ferrallitique (terre de Barre) (chiffres contrôlés par la féculerie de Gana-vé).

N‰	pH	rendement T/ha	appréciation
0,39	5,3	5 T	bas
0,44	5,1	5 T	bas
0,56	5,4	20 T	médiocre
0,56	6	40 T	moyen
0,72	5,9	40 T	moyen
0,67	6,1	40 T	moyen
1,1	6	60 T	bon

Le manioc est une plante qui peut donner des rendements très élevés, même dans des sols relativement pauvres .

Sols des Régions Humides .

Culture du cacao en basse Côte d'Ivoire sur sols ferrallitiques très lessivés plus ou moins dégradés . Tableau 15.

N‰	pH	rendement kg/ha	appréciation
0,53	4,6	240	très bas
0,7	4,6	300	médiocre à bas
0,6	5,3	630	médiocre à moyen
1,03	5,9	1200	bon

Il est plus difficile de donner une appréciation sur les rendements, car les plantations ne sont pas toujours parfaitement entretenues .

Culture bananière en basse Côte d'Ivoire . Tableau 16.

Type de sol	N‰	pH	rendement	appréciation
sol ferrallitique sur sable	0,56	4,5	moins de 10 T/ha	très bas à médiocre
sol hydromorphe	1,5	4,5	20 T/ha	moyen
sols ferrallitiques sur roches	1,5	7	40 T/ha	très bon à exceptionnel
basiques	3	7	40 à 60 T/ha	exceptionnel

Même en basse Côte d'Ivoire avec 1700 mm de pluie, la culture bananière nécessite des arrosages d'appoint .

D'après DUGAIN, dans les sols hydromorphes de Guinée, riches en matière organique, la variation du rendement en Banane en fonction du pH est la suivante : Tableau 17.

pH	5	5,5	6
indice de rendement	100	152	182

Il serait possible de multiplier les exemples, des cultures comme le maïs, la canne à sucre, le caféier, etc suivent sensiblement les mêmes règles de fertilité chimique que le cacaoyer ou le bananier, en ce qui concerne l'équilibre N total - pH.

Le palmier à huile semble être une plante peu exigeante à ce point de vue, des rendements moyens peuvent être obtenus (avec enrichissement potassique du sol) dans des sols classés " médiocres " dans l'échelle de fertilité, par exemple (N compris entre 0,6‰ et 1‰ et pH = 4,5).

Cette échelle de fertilité bouleverse un peu les notions traditionnelles en ce qui concerne les limites du pH des plantes. Dans les sols tropicaux, ces limites semblent beaucoup plus larges qu'il n'est indiqué dans certains manuels d'agriculture générale, il subsiste cependant certaines préférences par exemple : sols acides, $\text{pH} \leq 6$ pour palmier à huile et hévéa, théier, sols plutôt neutres ($\text{pH} \approx 6$) pour café, cacao, banane, maïs, canne à sucre, etc, mais l'action du pH est essentiellement une action indirecte qui conditionne l'alimentation azotée des plantes par l'intermédiaire de l'activité biologique; un cas particulier est celui de la culture rizicole qui est étudiée séparément . L'action directe du pH existe surtout dans les cas extrêmes ≤ 4 ou sup. à 8,5 cas de toxicité aluminique ou manganique, toxicité sodique, etc., carences diverses en oligo-éléments, etc .

1.4. Problème de l'azote minéral dans les sols tropicaux.

Cas des sols exondés. Ce problème a été assez étudié au point de vue microbiologique mais pas assez au point de vue chimique, c'est-à-dire de l'évolution des teneurs en NO_3^- et NH_4^+ solubles dans les sols en fonction des saisons. MOULINIER (1962), dans les sols de Bingerville (Côte d'Ivoire), sous forte pluviométrie, 1700 mm, avec trois mois de saison sèche (Janvier-Février Mars) a observé les résultats suivants :

Les teneurs en azote nitrique et ammoniacal présentent des variations rapides en dents de scie, car une pluie même faible lessive rapidement les nitrates; cette teneur remonte assez rapidement entre les pluies si l'humidité est suffisante. Il

existe cependant une variation à plus forte amplitude et l'on note un maximum d'azote minéral dans les sols durant la période sèche (Janvier-Février-Mars), les teneurs minima s'observent dès juillet (début de grande saison des pluies), dans tous les cas, la teneur en azote ammoniacal est élevée par rapport à la teneur en azote nitrique (sol à pH fortement acide). La production d'azote nitrique est très fortement accrue par le chaulage qui augmente le pH du sol qui tend vers la neutralité .

En conclusion, l'azote minéral s'accumule en saison sèche et il faut effectuer des semis précoces pour éviter les pertes d'azote par lessivage, en début de saison des pluies, cette conclusion semble assez générale et a été vérifiée pour la culture sèche du coton (Tchad) ou celle de l'arachide (Sénégal). Les rendements augmentent avec la précocité des semis . L'accroissement du pH provoque une plus forte production de nitrates .

B. DABIN (1954-1956) a effectué des mesures de vitesse de nitrification dans différents sols et sous différentes cultures .

Dans les Terres de Barre (sols faiblement ferrallitiques) au Togo, le rendement en manioc suit assez étroitement la vitesse de nitrification :

pas de nitrification, même après 18 jours	rendement 5 à 6 ton./ha
début de nitrification au bout de 15 "	" 10/tonnes/ha
début de nitrification 5 à 6 jours	" 30 à 40 t./ha

Cas des sols de Rizière . En ce qui concerne le riz, le résultat se trouve inversé :

Sol hydromorphe argileux (pH 5 à 5,5); rendement en riz élevé; début de nitrification 21 jours.

Sol brun^{sub}/aride argileux (pH 6,5 à 7); rendement en riz moyen; début de nitrification 13 jours .

Vertisol (pH 7 à 8); rendement en riz mauvais; début de nitrification 8 à 9 jours .

Dans le cas du riz, le rendement est en raison inverse de la vitesse de nitrification .

Il est d'ailleurs possible de vérifier directement sur le terrain la présence de nitrite par le réactif de Griess, dans le

sol de rizière. Lorsque le réactif donne un résultat négatif, pas de nitrite, les plants sont verts et vigoureux. Lorsque le réactif donne un résultat positif, les plants sont jaunes .

Dans des essais en pots sur sol argileux, du sulfate d'ammoniaque amené en surface (où il peut nitrifier) donne un développement moitié moindre que du sulfate d'ammoniaque enfoui entre 15 et 20 cm, où il ne nitrifie que très faiblement . La réaction de Griess est positive dans le premier cas, négative dans le second cas .

Evaluation de la fertilité des rizières en fonction du taux d'azote total et du pH.

Dans les sols du Delta central nigérien , la teneur en azote total comprises entre 0,15‰ et 1 ‰, les rendements en riz sont sensiblement proportionnels au taux d'azote total, par exemple à pH 6, ils peuvent varier de moins de 1000 kg/ha à plus de 5000 kg/ha, dans des sols à texture suffisamment fine.

Les variations de pH modifient les rendements; au-dessous de pH 5, dans des sols à teneur en azote peu élevée, les rendements baissent fortement; entre pH 5 et 6, les rendements augmentent rapidement; entre pH 6 et 7, les rendements baissent légèrement; au-delà du pH 7, les rendements baissent rapidement. Il semble donc qu'un optimum de rendement s'observe autour de pH 6. Cette action du pH est surtout sensible dans les sols dont le taux d'azote total est inférieur à 1‰, au-delà, les variations de rendement sont très atténuées. Il semble bien que la valeur du pH règle les rapports $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$, la vitesse de nitrification étant accélérée au-delà de pH 7 et ralentie au-dessous de pH 6. Le riz s'alimente principalement à partir d'azote ammoniacal; les engrais nitriques en particulier sont sans effet, alors que le sulfate d'ammoniaque donne une réaction importante et immédiate sur la croissance et les rendements.

Un autre facteur qui agit sur la nitrification est la texture du sol. Dans les sols à texture grossière, même en milieu inondé, l'alimentation du riz est mauvaise, dans les sols à texture fine et structure compacte, la nitrification est très ralentie sauf à pH supérieur à 7 (vertisols).

Un facteur très important de fertilité est la période de mise en eau des rizières. Les rizières semées directement au semoir avant les pluies commencent leur levée avec la pluie, et la mise en eau se fait au bout de 15 jours ou trois semaines lorsque les plants de riz ont atteint 20 cm de haut, à ce moment, on observe dans de nombreux sols un jaunissement généralisé des plants, l'analyse du sol révèle alors de fortes quantités de nitrite. Pendant la levée à sec, l'ammonium s'est transformé en nitrate, après la mise en eau, celui-ci a été entraîné à faible profondeur et a été réduit en nitrite qui peut avoir une action toxique.

Pour éviter ce phénomène de jaunissement des rizières, la solution adoptée consiste à semer directement le riz par avion sous une lame d'eau continue de 10 cm d'épaisseur, la nitrification ne peut se produire par manque d'oxygène ou est très ralentie, le jaunissement n'a pas lieu. En cas de jaunissement, le remède consiste à apporter un complément de sulfate d'ammoniaque.

Un tableau général de fertilité en fonction de l'azote total et du pH a été établi pour la riziculture humide, et complète le tableau concernant les cultures diverses (Fig. 30.)

Exemples (Delta Nigérien). Tableau 18 .

Types de sols	N‰	pH	rendement en paddy Kg/ha
Sol brun aride argileux	0,6	6,2	4000
Sol hydromorphe minéral argilo-limoneux	0,6	5,5	3000
Sol brun aride argileux	0,62	6,8	2800
Sol hydromorphe moyennement humifère (Guinée)	2	4,5	2400 (fort besoin en P)
Sol ferrugineux tropical peu lessivé limoneux	0,3	6	2200
Sol ferrugineux tropical ocre argileux	0,37	5,5	2000
Vertisol	0,4	7,5	900
Vertisol	0,25	7,5	600

2.- LE PHOSPHORE DANS LES SOLS TROPICAUX

2.1. Introduction.

Les sols tropicaux sont généralement considérés comme étant pauvres en Phosphore, et il est vrai que la majorité des sols tropicaux acides, pauvres en calcium, et matière organique, ne possèdent qu'une très faible quantité de phosphore " assimilable " d'après les techniques courantes utilisées pour les sols tempérés.

Comme il a été indiqué dans un autre chapitre, les sols à sesquioxydes, en particulier sols ferrugineux tropicaux et sols ferrallitiques, présentent le phosphore sous forme de phosphate de fer et d'aluminium, ces phosphates ayant la propriété d'être très peu solubles dans l'eau et dans la plupart des réactifs acides courants .

En réalité, dans le sol, il ne s'agit pas de composés chimiques simples, mais de liaisons complexes pouvant être hydrolysées différemment. Il semble à présent démontré que les plantes peuvent s'alimenter à partir de ces phosphates liés aux sesquioxydes; il existe également d'autres formes encore moins solubles, phosphates d'inclusion, phosphore organique, etc .

2.2. Le Phosphore total. Analyse.

Jusqu'à présent, il a surtout été fait appel à l'empirisme pour déterminer la richesse en phosphore dans les sols tropicaux, les techniques courantes (méthode DYER, méthode TRUOG) ne donnant que des chiffres très bas (3 à 20 ppm P_2O_5) dans la plupart des cas, on a essayé de déterminer la réserve en phosphore du sol. La méthode utilisée est l'attaque à l'acide nitrique concentré et bouillant pendant 5 heures. Cette méthode ne donne peut-être pas la totalité du phosphore, mais elle s'est avérée simple et reproductible.

Deux constatations importantes ont été faites, DABIN (1956) : d'une part, quel que soit le type de sol, la pluviométrie, la roche-mère, il existe une relation statistique entre N total et P_2O_5 total , le rapport $\frac{N}{P_2O_5}$ moyen variant de 2 à 4 suivant la richesse en azote du sol; d'autre part, dans un sol donné, la richesse du sol et la réaction aux engrais varie en

fonction de la teneur en P_2O_5 total, les normes d'interprétation pouvant varier d'un type de sol à l'autre (Fig. 31, 32).

Exemples.

Sols des régions semi-arides. Dans les sols de rizière du Mali (Delta Central Nigérien) qui avaient été considérés comme très pauvres en phosphore par les premiers agronomes (1930-1945) de très nombreux essais d'engrais phosphatés ont été réalisés après 1945. Ces essais d'engrais phosphatés ont été effectués avec des doses pouvant être élevées de 0,5 T à 5 T/ha (pour saturer le pouvoir de fixation) en utilisant des formes très variées : phosphates naturels, bicalciques, superphosphates, et n'ont donné que très rarement des résultats positifs. Par contre, les engrais azotés, employés seuls, donnaient des excédents spectaculaires de rendement, et les engrais binaires azote, phosphore, n'étaient pas supérieurs à l'azote seul .

Les analyses de plantes dans les témoins ou avec l'azote seul, ont révélé une composition correcte de la plante et une forte exportation de phosphore provenant du sol, il a bien fallu se rendre à l'évidence : même avec un taux de P_2O_5 jugé très bas (0,3 %), le sol pouvait fournir suffisamment de phosphore pour une récolte de 3 à 5 tonnes de paddy à l'hectare .

En revanche, des essais réalisés dans d'autres sols ont montré des réactions variables aux engrais phosphatés, l'analyse du phosphore total a donné des résultats deux à cinq fois plus faibles que précédemment .

Enfin, des essais en pots, c'est-à-dire avec une quantité de terre limitée, ont mis en évidence des réactions nettes aux engrais phosphatés.

Tableau 19 - Relations entre P_{2O_5} total dans le sol et réaction aux engrais dans les rizières du Mali .

P_{2O_5} total ‰	Réaction aux engrais
0,04 0,06	réaction nette aux engrais phosphatés employés seuls
0,17 0,19	réaction aux engrais phosphatés seulement en présence d'engrais azotés
0,25 0,27	pas de réaction aux engrais phosphatés réaction nette avec le sulfate d'ammoniaque employé seul .

Le taux d'azote total de ces sols varie de 0,5 à 0,6‰, le pH varie de 5,5 à 6. Ce résultat, obtenu en culture rizicole a été confirmé en culture cotonnière.

Tableau 20. Culture du Coton dans les sols du Mali (sols bruns sub arides).

P_{2O_5} total ‰	Réaction aux engrais
0,1 ‰	réaction aux engrais phosphatés seuls
0,1 à 0,2 ‰	réaction faible aux engrais phosphatés seuls réaction nette en présence d'engrais azotés
0,2 à 0,3 ‰	pas de réaction avec P seul action de N - P peu supérieure à N seul
0,35 à 0,45 ‰	seuls les engrais azotés agissent

Des résultats analogues ont été obtenus dans les sols à coton de la Gesirah (Soudan). Les taux d'azote total de ces sols ne dépassent pas 0,35 à 0,45‰, le pH est voisin de 7, les rendements en coton graine peuvent atteindre 2000 Kg/ha et plus.

Tableau 21.

TENEURS en AZOTE TOTAL et PHOSPHORE TOTAL (Horizon supérieur) dans différents sols d'AFRIQUE OCCIDENTALE							
Origine des prélè- vements	N o/oo	P ₂ O ₅ o/oo	Observations	Origine des prélèvements	N o/oo	P ₂ O ₅ o/oo	Observations
Sols allu- vionnaires de la bou- cle du Ni- ger.	0,3 0,25 0,37	0,15 0,15 0,13	Sols pauvres	Terres noi- res sur ro- ches basi- ques du TO- GO.	0,78 0,78	0,502 0,562	Sols chimique- ment assez ri- ches mais à structure com- pacte.
Pluviomé- trie 500 à 600 mm.	0,4 0,5 0,53	0,2 0,25 0,21	Sols de fer tilité moy.	Pluviomé- trie 1200 mm.	0,84 1,17	0,446 0,569	
Sols irri- gués	0,6 0,6	0,25 0,3 0,3	Sols de fer tilité cor- recte.	Sols latéri- tisés sur Gabbros Sotoubous TOGO	1,17 1,17 1,01 0,78	0,43 0,36 0,67 0,311	Sols très gra- villonnaires. La fertilité croît forte- ment avec le taux d'Azote et phosphore
Terres de Barre du TOGO	0,39 0,39 0,39 0,33 0,39	0,17 0,19 0,14 0,13 0,25	Sols pauvres	Pluviomé- trie 1.400 mm.	1,3 1,4 1,6 2,18 2,18	0,63 0,73 0,65 0,72 0,82	
Pluviomé- trie 700 à 1.100 mm.	0,50 0,56 0,56 0,61 0,72 1 1,4	0,228 0,228 0,24 0,42 0,42 0,48 0,75	Sols de fer tilité cor- recte Sols assez riches	Sols latéri- tisés sur granito- gneiss TOVE-TOGO Pluviomé- trie 1.700 mm	0,72 0,72 1 1,5 1,5 1,23 2,3 2,82	0,36 0,41 0,56 0,66 0,62 0,64 0,81 0,98	Sols en moyen- ne assez fer- tiles. La fer- tilité croît avec le taux d'Azote et de Phosphore
Sols allu- vionnaires de la Val- lée de l' Ouémé au Dahomey	2 2 2,4 3,5 3,8	0,44 0,84 0,66 0,62 0,68	Sols chimi- quement ri- ches.	Sols de la Basse Côte d'Ivoire	1,31 2,4 3,3	0,67 0,70 1,05	Sols de Forêt
Pluviomé- trie 1200 mm	3,9 4,2 4,2	0,81 0,74 0,85	Sols chimi- quement ri- ches, mais présentant un excès d'Azote	Pluviomé- trie supé- rieure à 2.000 mm	0,3 3,8 3	0,16 1,15 1,14	Sol de Savane Sol de forêt
Sols inon- dés	4,3	0,85		Sables lagu- naires du SUD-TOGO	0,36 0,39 0,29 0,57	0,14 0,15 0,33 0,34	Sols de coco- teraie. Très pauvres pour les cultu- res annuelles. Termitières plus riches.

Seuls les engrais azotes agissent, les taux de phosphore total sont de l'ordre de 0,4% .

Dans les sols à arachide (Sénégal-Niger) qui sont des sols très sableux et très pauvres en azote, l'action des engrais phosphatés s'est avérée efficace dans de nombreux cas, néanmoins, les analyses de phosphore total ont montré que ces réactions se produisaient lorsque la teneur en acide phosphorique était inférieure à 0,15 % de P_2O_5 total, il n'existait que de faibles réactions aux phosphates .

Sols des régions semi-humides. Dans les sols des régions plus humides, Togo, Dahomey, Nord Côte d'Ivoire, etc, les dosages de phosphore total ont montré que les limites de réaction aux engrais phosphatés se situaient à un niveau plus élevé .

Sols ferrugineux tropicaux lessivés (Bouaké)

Culture du Coton (d'après DABIN et BERGER)

Tableau 22.

P_2O_5 % total	fertilité
inférieur à 0,4 %	pauvre
0,4 à 0,7 %	médiocre
0,7 à 0,9 %	moyen
supérieur à 0,9 %	riche

Dans les sols de fertilité moyenne, le taux d'azote total varie de 0,8 à 1,4 % , le pH varie de 6,3 à 6,5 .

Ces normes sont assez sévères en raison du déficit de pluviométrie de ces régions et peut-être de la grande richesse en fer mobile dans ces sols .

Sols des régions humides . En basse Côte d'Ivoire, une région très cultivée correspond à la zone des dépôts sablo-argileux tertiaires, le sol est de type ferrallitique très désaturé.

Dans les sols non dégradés, les engrais phosphates ne donnent pas de réaction (Fig.33), des essais effectués sur manioc ont montré que le meilleur engrais dans ces sols est le nitrate de potassium (carence en azote et potassium), l'addition

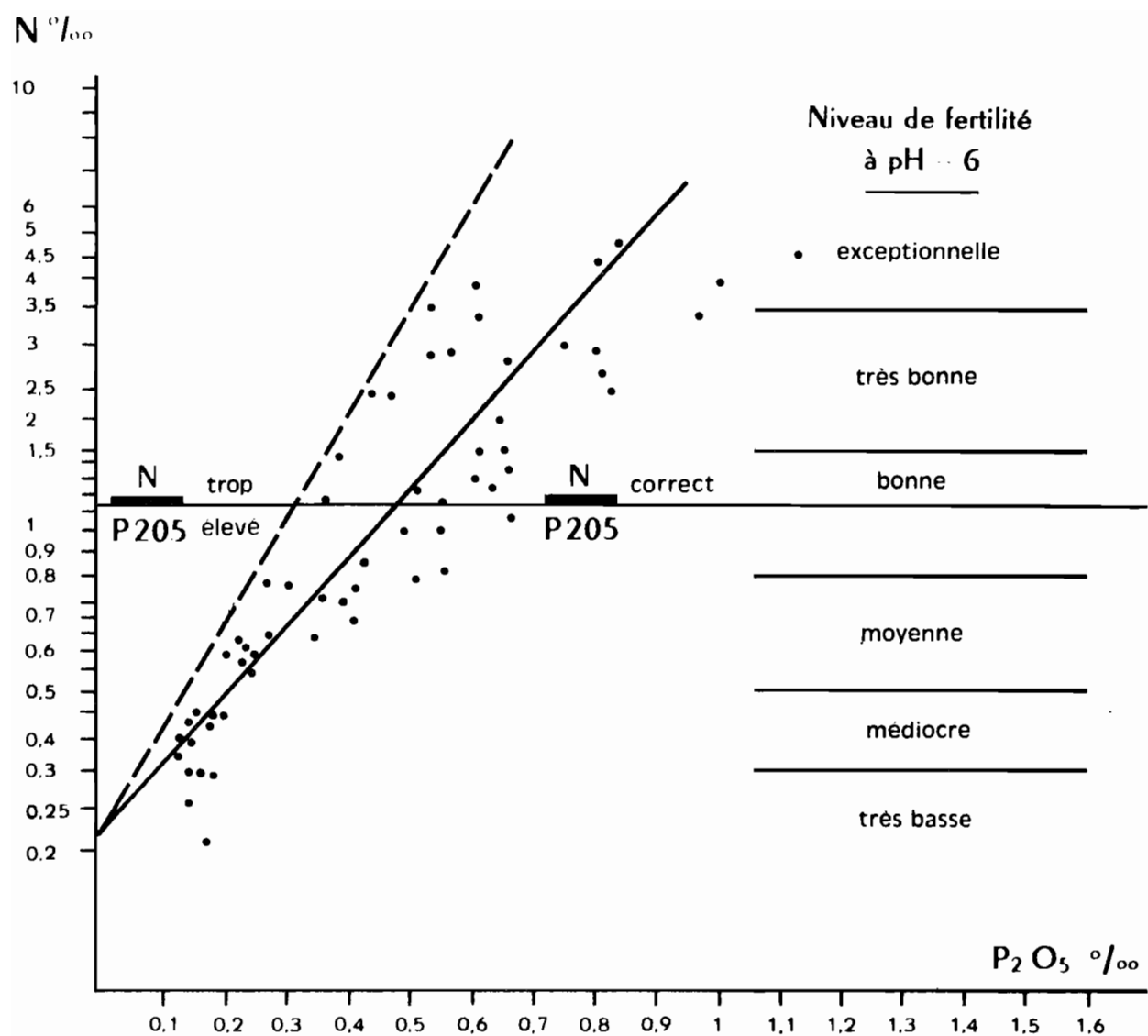


Fig. 31 - Appréciation du niveau de fertilité en fonction de l'azote et de l'acide phosphorique

d'engrais phosphatés ne donne aucun accroissement de rendement par rapport au nitrate de potassium . Les taux de P_2O_5 total dans ces sols dépassent généralement 0,5 à 0,7 ‰.

MOULINIER (1962) donne la relation suivante entre le phosphore total et le rendement des cacaoyères dans les sols ferrallitiques sur schistes de Côte d'Ivoire.

Rendement en Cacao	P_2O_5 total ‰
100	0,15
300	0,25
600	0,35
800	0,45

Essai de synthèse

Les quantités minima de phosphore indiquant un besoin net en phosphore dans les sols sont variables suivant les cas, si l'on reporte ces teneurs sur le graphique représentant les variations de phosphore total en fonction d'azote total, on s'aperçoit qu'elles sont voisines ou inférieures aux teneurs de la courbe statistique moyenne (Fig. 32).

Entre 0,15 et 1,5 ‰ d'azote total, le rapport $\frac{N}{P_2O_5}$ de la courbe moyenne est d'environ 2. Lorsque $\frac{N}{P_2O_5}$ est inférieur à 2, les sols réagissent rarement aux engrais phosphatés . Entre 2 et 4, les sols réagissent diversement, Lorsque $\frac{N}{P_2O_5}$ est supérieur à 4, les sols sont généralement carencés $\frac{N}{P_2O_5}$ en phosphore.

MOLINIER (1962) signale que dans le cas de la culture caféière, pour un taux d'azote de 2‰ , le phosphore doit être supérieur à 0,5 ‰ , ($\frac{N}{P_2O_5}$ non supérieur à 4), en culture cacaoyère $\frac{N}{P_2O_5}$ ne doit pas être supérieur à 2, pour obtenir de bons rendements; le cacaoyer est plus exigeant en phosphore que le caféier .

Dans les sols sur sables tertiaires non dégradés $\frac{N}{P_2O_5}$ est voisin de 1 (B. DABIN), ces sols ne réagissent pas aux engrais phosphatés .

Dans les sols cultivés en cacaoyer depuis de nombreuses années, le taux de P_2O_5 total diminue fortement $\frac{N}{P_2O_5}$ peut atteindre 2 et le dépasser, le besoin en phosphore apparaît (Fig. 32 et 33 .

2.3. Le Phosphore assimilable.

. Méthode DYER . La méthode DYER (acide citrique à 2%) est une technique très utilisée en France où elle donne de bons résultats sauf dans les sols calcaires. Elle a été essayée dans les sols des régions sèches (Delta Central Nigérien), les résultats obtenus étaient de l'ordre de 3 ppm ou 0,03 ‰ de P_2O_5 , même dans des sols ne réagissant pas aux engrais phosphatés. A la suite d'apports massifs de phosphate tricalcique (5000 kg/ha) le taux de P_2O_5 total du sol est passé de 0,25 ‰ à 0,58 ‰ et la teneur en P_2O_5 citrique a atteint 0,17 ‰.

Dans les sols des régions plus humides, Côte d'Ivoire en particulier, la méthode citrique s'est avérée plus utilisable . Dans les sols de bananeraie diversement enrichis en phosphore par des apports d'engrais, une relation phosphore total, phosphore assimilable citrique a été établie (Fig. 36). Ce graphique montre que jusqu'à 0,5 ‰ de phosphore total, la teneur en phosphore citrique reste très faible de l'ordre de 50 ppm (0,05 ‰). Au delà de 0,5 ‰ de phosphore total le phosphore citrique augmente proportionnellement au phosphore total.

Il semble donc que cette valeur de 0,5 ‰ de phosphore total dans la majorité des sols, où le taux d'azote varie autour de 1 ‰, correspond à une valeur limite au-delà de laquelle le phosphore n'est fixé que faiblement sur le sol, et passe entièrement à l'état assimilable; au-dessous de 0,5 ‰, le phosphore est donc fortement fixé sur le sol. Cette limite de fixation se situe vers le rapport $\frac{N}{P_2O_5} = 2$.

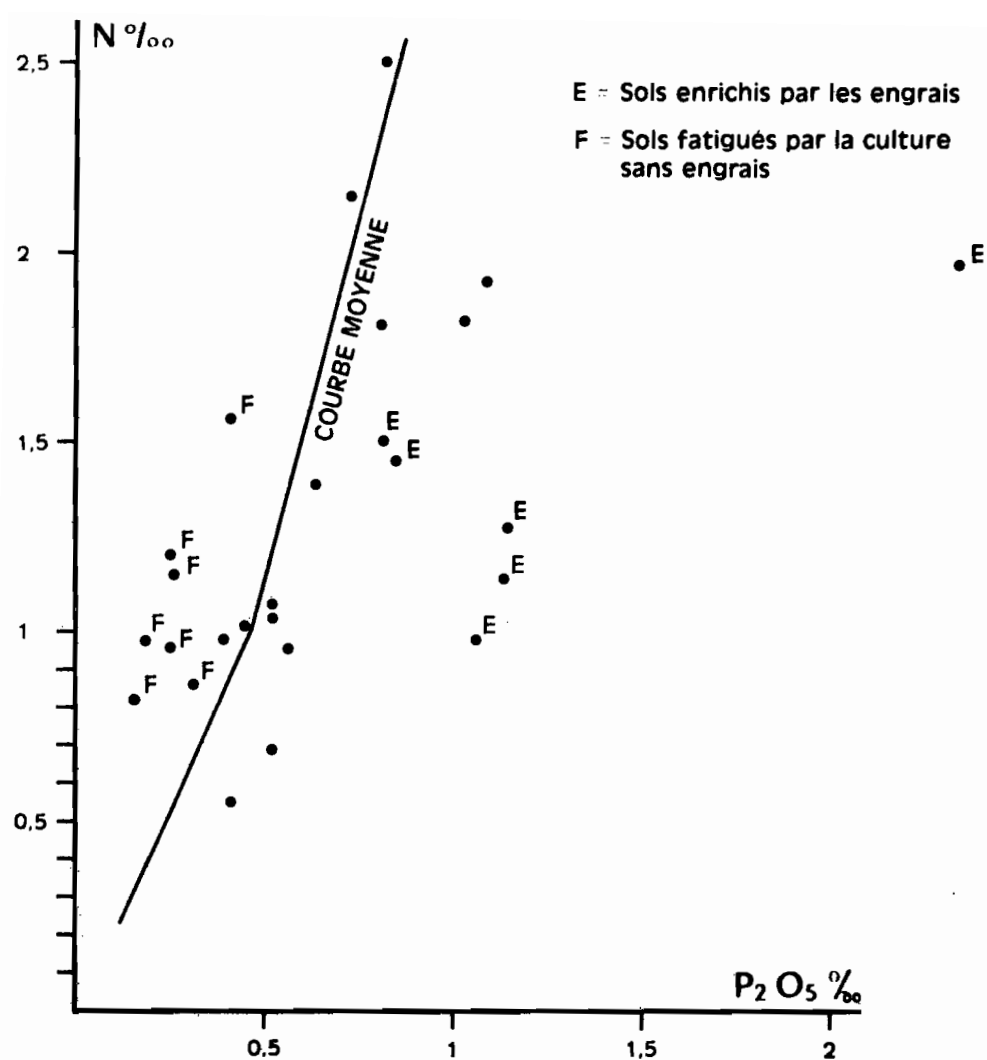


Fig. 32 - Relation entre la teneur en azote total, l'acide phosphorique total et la fertilité dans des sols ferrallitiques moyennement désaturés.

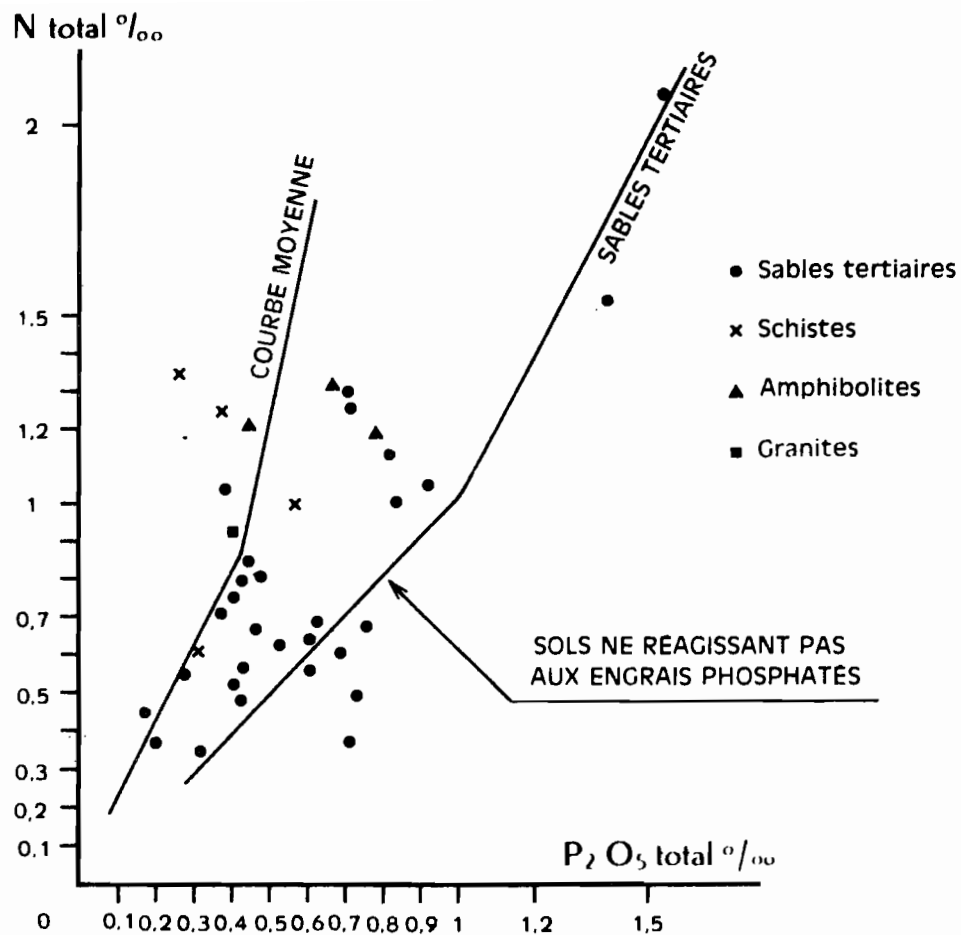


Fig. 33 - Relation entre la teneur en azote total, l'acide phosphorique total, la fertilité dans des sols ferrallitiques très désaturés.

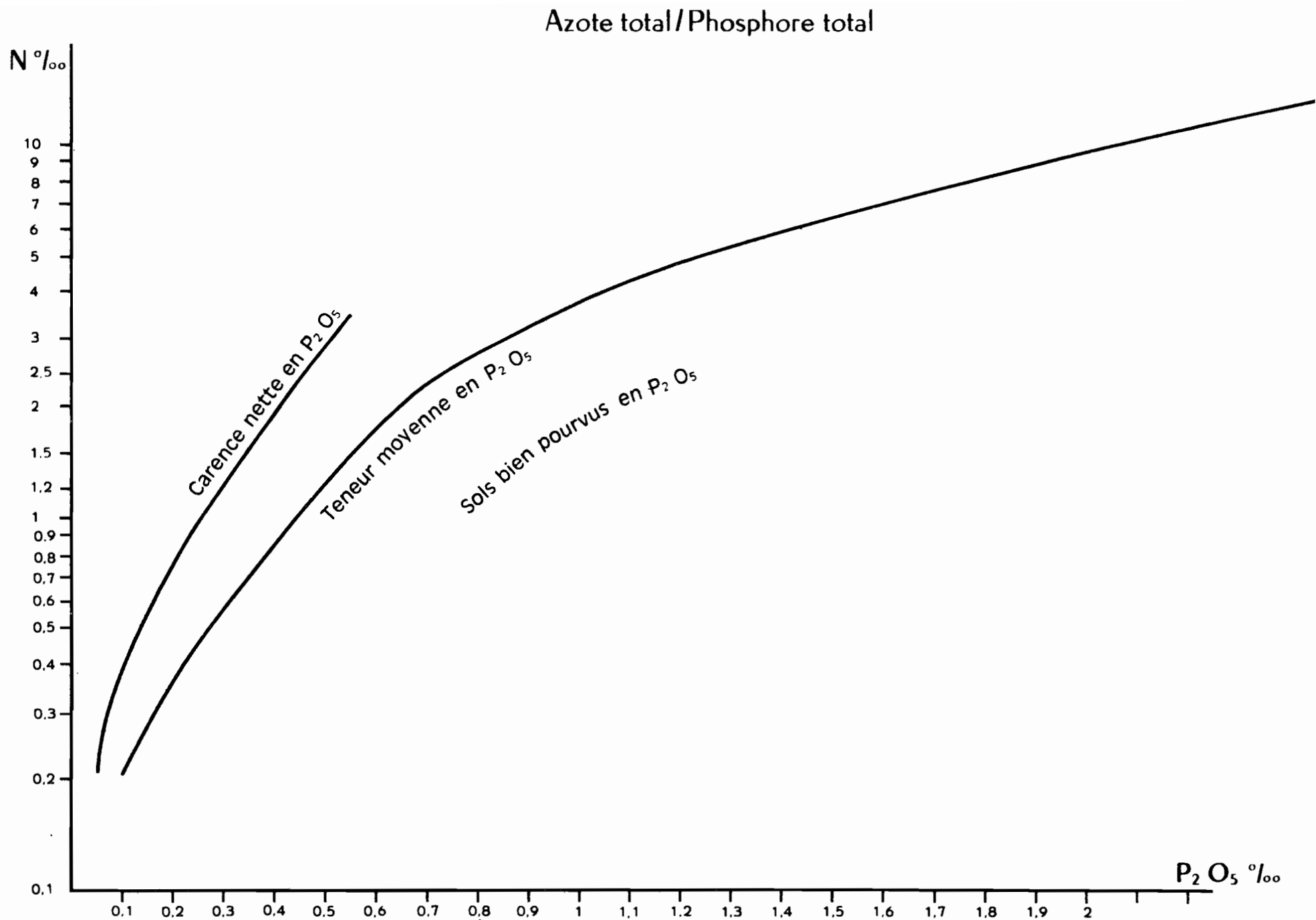


Fig. 34 - Abaque de fertilité pour les sols tropicaux tenant compte de l'azote total et l'acide phosphorique total

Une courbe identique a été dressée pour les sols ferrugineux tropicaux lessivés de la région de Bouaké. La limite au-delà de laquelle le phosphore passe totalement à l'état assimilable se situe au-dessus de 0,7 % de phosphore total. Cette limite de fixation n'est pas seulement fonction du rapport $\frac{N}{P_2O_5}$ mais peut être aussi d'autres facteurs comme la teneur en fer mobile dans le sol.

. Méthode de TRUOG. La méthode de TRUOG (acide sulfurique 0,002 N tamponné à pH 3,5 par le sulfate d'ammoniaque) donne d'excellents résultats dans les sols des pays tempérés faiblement acides, neutres ou faiblement calcaires; son intérêt résidait autrefois dans la facilité de dosage colorimétrique directe des extraits. A présent, même les extraits organiques peuvent être dosés directement par voie colorimétrique (DUVAL).

Dans la plupart des sols de Côte d'Ivoire, même bien pourvus en phosphore, les doses dépassent rarement 20 ppm de P_2O_5 .

FORESTIER en République Centrafricaine (1960) a appliqué la méthode TRUOG à la culture du caféier. Il a étudié les réactions aux engrais et la composition des feuilles de caféier en fonction de la composition du sol. Dans des sols contenant 20 à 30% d'éléments fins (A + L), une teneur de 15 ppm est suffisante pour assurer une bonne alimentation des plantes. Dans des sols contenant 10% d'éléments fins, la limite peut descendre à 10 ppm. Ces taux limites sont si bas qu'ils correspondent à la limite de sensibilité des dosages et sont donc sans intérêt pratique.

. Méthode de CHANG et JACKSON. Cette méthode a permis d'apporter quelques explications aux résultats un peu incohérents obtenus avec les techniques précédentes.

Cette méthode consiste à séparer les différentes formes de phosphore liées aux différents éléments fixateurs, calcium, fer, aluminium, elle permet de distinguer les formes de phosphore d'inclusion, entourées d'une pellicule d'oxydes et donc très fortement rétrogradées, elle permet aussi par différence de déterminer le phosphore organique.

Le phosphore soluble est extrait par NH_4Cl .

Le phosphore lié à Al est extrait par FNH_4 0,5 N à pH 7.

Le phosphore lié à Fe est extrait par NaOH 0,1 N.

Le phosphore lié à Ca est extrait par SO_4H_2 0,5 N.

Le phosphore d'inclusion est extrait par chloration et réduction par l'hydrosulfite de soude (qui dissout les pellicules de sesquioxides).

Le phosphore organique peut être extrait après destruction de la matière organique par H_2O_2 ou par calcination .

Les résultats montrent que la forme dominante de phosphore dans le sol est la forme d'inclusion (la plus stable), ensuite vient la forme organique, également très stable, enfin les formes de phosphore liées au calcium, au fer et à l'aluminium sont en proportions variables en fonction du pH du sol. Dans les sols acides, les formes liées au fer dominant. Dans les sols neutres ou calcaires, les formes liées à calcium dominant .

Les formes liées à l'aluminium varient peu en fonction du pH mais semblent conditionner assez étroitement la fertilité des sols .

Exemples. Tableau 24.

Sols ferrallitiques de Côte d'Ivoire Sols ferrallitiques très lessivés, Adiopodoumé sols à pH 4,5				!Sol faiblement! !ferrallitique ! !désaturé Bamoro !sol à pH 7 ! !
Pc ppm	sol érodé	sol sous forêt	sol amélioré par la culture	sol très fertile
P Al	7,5	12,5	32,4	42
P Ca	2,5	2	6,25	78
P Fe	60	50	45	7,5
P Fe inclusion	310	210	160	200
P organique	62,5	110	130	120

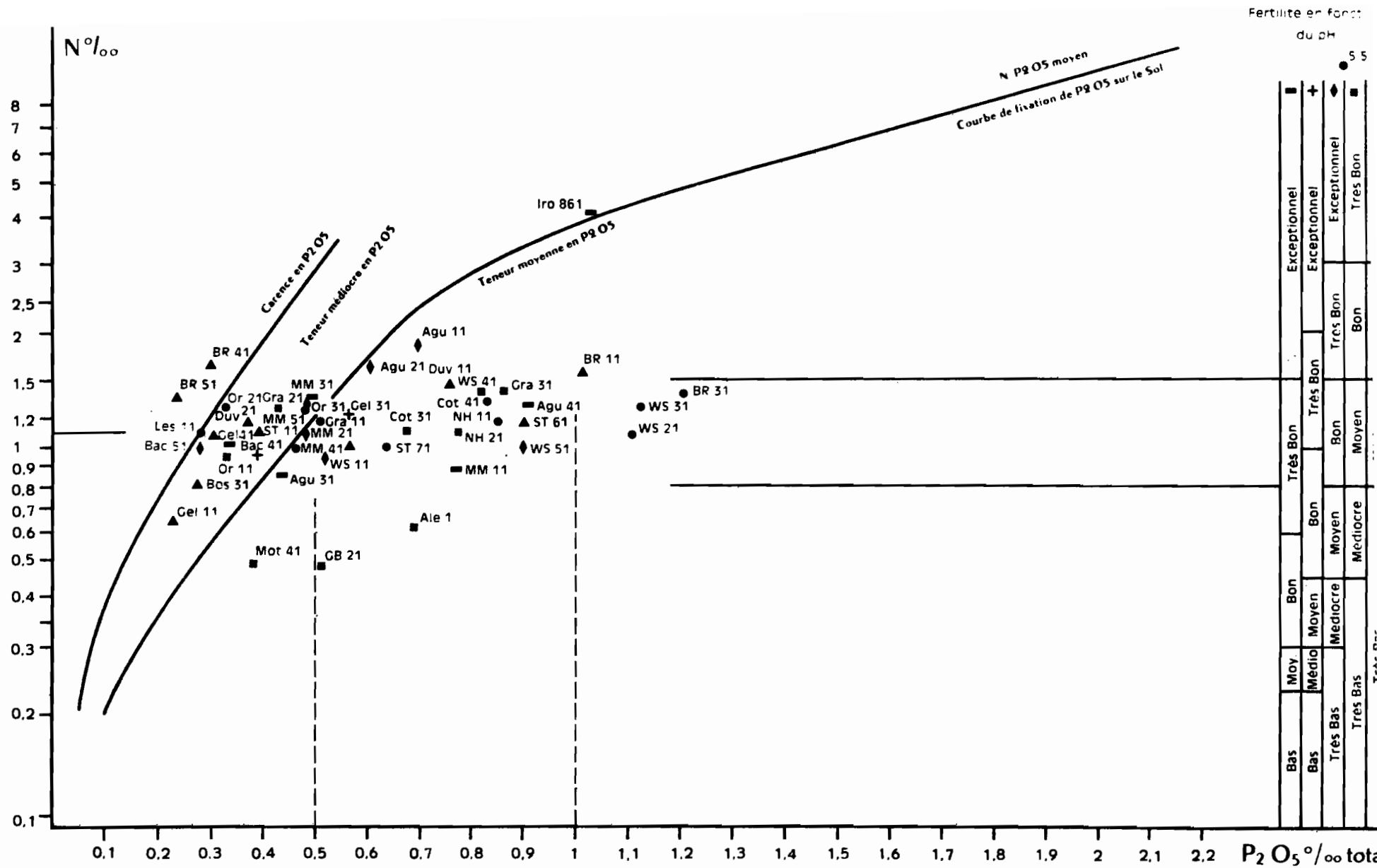


Fig. 35 - Relation entre l'azote total, l'acide phosphorique total et la fertilité dans des sols de bananeraies Côte d'Ivoire.

RELATION "N" TOTAL P_2O_5 TOTAL — P_2O_5 ASSIMILABLE (méthode Dyer)

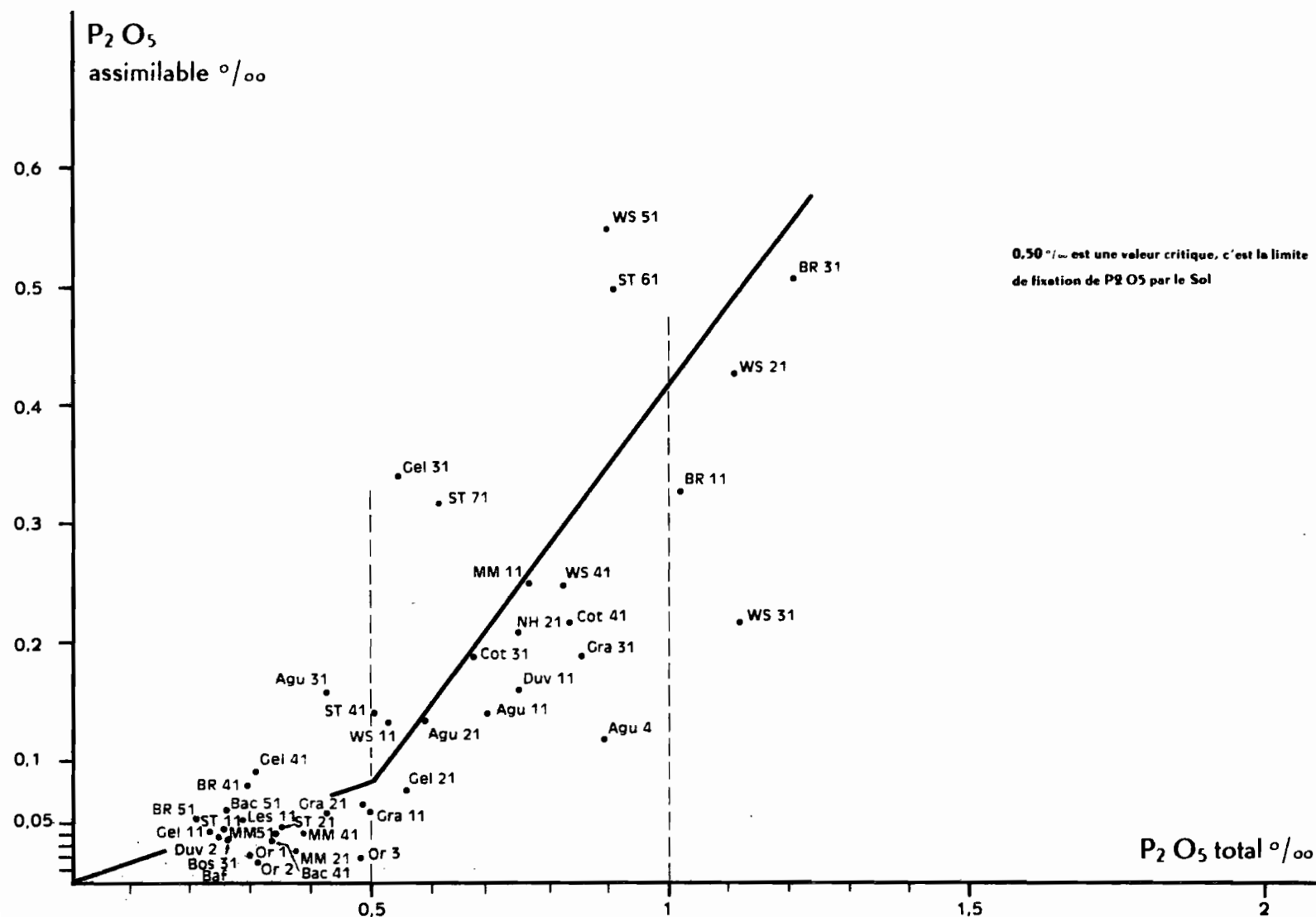


Fig. 36 - Relation entre l'acide phosphorique assimilable (Méthode Dyer) et l'acide phosphorique total.

Les chiffres sont exprimés en ppm de P (environ moitié des chiffres exprimés en P_2O_5).

Les sols ont été classés par ordre de fertilité croissante, dans les sols acides le phosphate de fer domine, il a tendance à diminuer quand la fertilité augmente; le phosphate de chaux est très faible, il augmente dans le même sens que la fertilité; 6,25 ppm en P correspond à 15 ppm en P_2O_5 ($\frac{P_2O_5}{P} = \frac{71}{31}$), c'est-à-dire à la quantité considérée comme convenable par la méthode de TRUOG qui dans ces sols n'extrait que le phosphore lié au calcium .

Le phosphore lié à l'aluminium croît d'une façon nette avec la fertilité; dans les sols acides, il semble que ce soit la forme la plus intéressante à doser. L'acide citrique est susceptible dans une certaine mesure d'extraire le phosphore lié à l'aluminium.

Dans le sol fertile à pH neutre, c'est le phosphore lié au calcium qui domine, le phosphore lié à l'aluminium vient en second et est relativement élevé, le phosphore lié au fer est en faible quantité. Les phosphates d'inclusion et le phosphore organique ne semblent pas en liaison directe avec la fertilité; dans les exemples suivants, on ne considère donc que les formes de phosphore fraîchement précipitées .

Sols réagissant aux engrais phosphatés.

Tableau 25 .

P en ppm	Sols ferrugi-neux tropicaux	Sols ferralliti-ques-Antilles	Sols à allopha-ne - Antilles
P Al	7,5	22,5	25
P Ca	3,75	25	7,5
P Fe	10	110	15

Dans ces sols, les teneurs en phosphate d'alumine et en phosphate de chaux sont faibles, les teneurs en phosphate de fer peuvent être élevées .

Tableau 26

Sols ne réagissant pas aux engrais phosphatés.

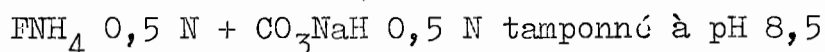
P en ppm	Sol ferrallitique lessivé Côte d'Ivoire	Sols à Montmorillonite réaction limite	Antilles sol très riche en phosphore
P Al	67,5	15	37,5
P Ca	7,5	56	195
P Fe	60	20	50

Il semble bien que la richesse en phosphore assimilable dans les sols acides soit en relation avec la somme P Al + P Ca. Cette somme doit être au moins égale à 70 ppm de P soit 0,165 % de P_2O_5 . Ces chiffres sont convenables et se rapprochent des normes utilisées dans les pays tempérés pour le phosphore assimilable.

Dans les sols à pH neutre, le phosphate de fer semble être en grande partie assimilable, l'extrait au réactif TRUOG donne un chiffre sensiblement égal à la somme P Al + P Ca + P Fe, néanmoins, dans ces sols P Fe est en faible quantité.

Dans les sols calcaires, P Ca domine très largement et n'est qu'en partie assimilable, il est alors nécessaire d'utiliser une autre technique pour déterminer la fraction assimilable du phosphate de chaux.

Essai d'utilisation d'une méthode unique. En raison de l'importance de la fraction phosphate d'aluminium, utilisable aux différents pH, un réactif composé d'un mélange :



permet d'extraire le phosphore lié à l'aluminium, grâce au fluorure d'ammonium; quant au carbonate acide de sodium agissant dans un temps court, il n'extraît que partiellement le phosphate de fer en sol acide, et partiellement le phosphate de chaux en sol calcaire.

D'après des essais récents, ce réactif donne des résultats identiques à la méthode TRUOG dans les sols neutres ou faiblement calcaires, et il donne des résultats en corrélation avec le phosphore citrique et le phosphore total dans les sols tropi-

caux acides, son pouvoir d'extraction est cependant supérieur à celui de l'acide citrique ce qui le rend plus intéressant dans les sols où la teneur en phosphore est médiocre.

Fixation du phosphore sur les sols . La présence de sesquioxides provoque une forte fixation du phosphore dans les sols tropicaux, mais ce phosphore fixé peut être néanmoins en grande partie utilisable par les plantes; des essais de fixation avec des phosphates solubles à l'eau ont donné des chiffres trop élevés et incompatibles avec la pratique agricole. Après enrichissement en phosphore du sol, il est préférable de remplacer les équilibres dans l'eau par des équilibres dans l'acide citrique ou un autre réactif, et d'établir la courbe phosphore total phosphore assimilable, pour déterminer un taux utile de fixation du phosphore. Comme nous l'avons vu précédemment, le point d'inflexion de la courbe peut indiquer un taux de phosphore total correspondant à une limite de fixation, et la différence entre ce taux et le taux réel de phosphore total dans le sol, donne une idée de la fumure phosphatée de fond à apporter dans le sol.

3. LES BASES ECHANGEABLES DANS LES SOLS TROPICAUX.

3.1. Introduction. Méthode d'analyse du complexe absorbant.

L'étude complète du complexe absorbant est devenue une détermination analytique courante dans les laboratoires de pédologie.

Cette étude comporte la détermination de la capacité totale d'échange de bases T exprimée en milliéquivalents pour 100 g, ainsi que l'analyse des principaux cations échangeables (Ca^{++} , Mg^{++} , K^+ , Na^+), la somme de ces cations est représentée par S en milliéquivalents pour 100 g .

Le $\frac{S}{T}$ exprime le coefficient de saturation du complexe absorbant en %.

Le réactif d'extraction des bases échangeables est l'acétate d'ammonium normal à pH 7; dans le cas des sols très alcalins, on peut utiliser un réactif à pH 8,5 .

La capacité d'échange peut être déterminée par des méthodes variées, en général on sature le sol par de l'ammonium, du calcium ou du baryum à pH 7 et on dose la totalité des cations fixés .

Dans les sols très alcalins, on peut saturer le sol par du sodium à pH 8,5.

La réserve totale en bases peut être obtenue par attaque à l'acide nitrique concentré et bouillant pendant 5 heures comme pour le phosphore total. Cette méthode peut être utile pour connaître la réserve en potassium du sol dont une partie importante migre entre les feuillets des argiles et peut être régénérée et servir à l'alimentation des plantes .

L'étude théorique du complexe absorbant a été présentée dans un autre chapitre, il est seulement rappelé ici quelques éléments d'interprétation qui peuvent être utiles dans la pratique.

3.2. Généralités sur le complexe absorbant.

. Capacité d'échange T. La capacité d'échange dépend du type d'argile et de la teneur en éléments fins minéraux ainsi que de la teneur en matière organique .

A pH 7	Kaolinite	10 mé	pour 100 g
	Illite	30 mé	" "
	Montmorillonite	100 mé	" "
	Humus	300 mé	" "

Dans les vertisols riches en montmorillonite, la capacité d'échange peut atteindre 50 à 60 mé. pour 100 g même si le sol est pauvre en matière organique.

Dans les sols ferrallitiques qui ne contiennent pratiquement que de la kaolinite, c'est la matière organique qui présente le principal pouvoir d'échange soit :

30% d'argile	3 mé
3% matière organique	<u>9 mé</u>
	12 mé pour 100 g.

. Fixation des cations. Les cations sont retenus en quantité variable en raison, en particulier, de leur force de fixation; dans les sols habituellement étudiés, l'ordre est le suivant : $\text{Ca} > \text{Mg} > \text{K} > \text{Na}$.

La proportion des cations dans le complexe est :

$$\text{Ca} = 75 \text{ à } 90 \% \text{ de T}$$

$$\text{Mg} = 10 \text{ à } 30 \%$$

$$\text{K} = 5 \text{ à } 10 \%$$

$$\text{Na} = 2 \text{ à } 5 \%$$

Dans les sols à alcali, c'est le sodium qui est le plus important .

Il sera indiqué par la suite les meilleurs équilibres compatibles avec la fertilité .

. Le pH. Le pH mesuré dans l'eau et dans le chlorure de potassium normal. Le pH dépend du taux de saturation en bases du complexe $\frac{S}{T}$ ainsi que la richesse en hydrogène échangeable $\frac{H}{T}$

$$\text{pH} = \text{pK} + \log \frac{\frac{S}{T}}{\frac{H}{T}}$$

Le pK est la constante de dissociation de l'argile .

Les montmorillonites saturées par H et par Al sont plus dissociées que les kaolinites saturées d'une façon identique. Les montmorillonites donnent des pH plus bas pour une saturation en bases identique, la différence atteint une unité pH. La montmorillonite se comporte comme un acide plus fort que la kaolinite.

Les ions monovalents donnent des pH plus élevés que les ions bivalents car ils sont plus dissociés : un sol saturé en calcium présente un pH voisin de 7, tandis qu'un sol saturé en sodium peut avoir un pH de 9 .

L'addition d'un sel (NaCl , CaCl_2) à une argile sodique , abaisse le pH. Le chlorure de calcium abaisse plus le pH que le chlorure de sodium.

Lorsqu'on mesure le pH dans une solution de chlorure de potassium, il y a un abaissement du pH par acidité d'échange, par rapport au pH dans l'eau . Il peut y avoir également déplacement d'aluminium échangeable avec libération d'ions hydrogène.

La différence (pH eau - pH KCl) est fonction du déficit de saturation des sols en bases, ainsi que la quantité d'ions H libérés par déplacement d'aluminium échangeable.

Dans les sols très acides ($\text{pH} < 4$), l'ion Cl peut se fixer sur les colloïdes amphotères, et libérer des ions OH^- ; c'est l'alcalinité d'échange. le pH KCl est alors supérieur au pH eau.

3.3. Action des bases sur la fertilité.

. Valeur de S. En ce qui concerne le calcium qui représente les $\frac{2}{3}$ de la valeur de S, les quantités sont généralement suffisantes pour assurer l'alimentation des plantes, c'est donc essentiellement par l'intermédiaire de la saturation du complexe et du pH que le calcium échangeable et la somme des bases interviennent sur la fertilité.

Pour chaque pH, la valeur de S dépend donc de la valeur de T et est très variable en fonction du type de sol. Si l'on veut donner une indication générale dans le cas des sols tropicaux courants, il est possible d'appliquer la règle suivante :

Par exemple, sol de texture moyenne $A + L = 30 \%$

Tableau 27 -

Mo = 2 %

S mc. pour 100 g. importance des réserves facilement utilisables	
$< 1,5$	réserves faibles
1,3 - 3	médiocres
3 - 6	moyennes
6 - 12	bonnes
12 - 24	très bonnes
> 24	exceptionnelles

Pour $A + L \leq 10\%$ il faut diviser les chiffres par 2

$A + L \geq 50\%$ il faut multiplier les chiffres par 2

Les chiffres précédents indiquent un niveau de " réserves facilement utilisables " c'est-à-dire la possibilité pour un sol de fournir un nombre plus ou moins grand de récoltes, quant à la fertilité " immédiate ", elle est fonction du pH.

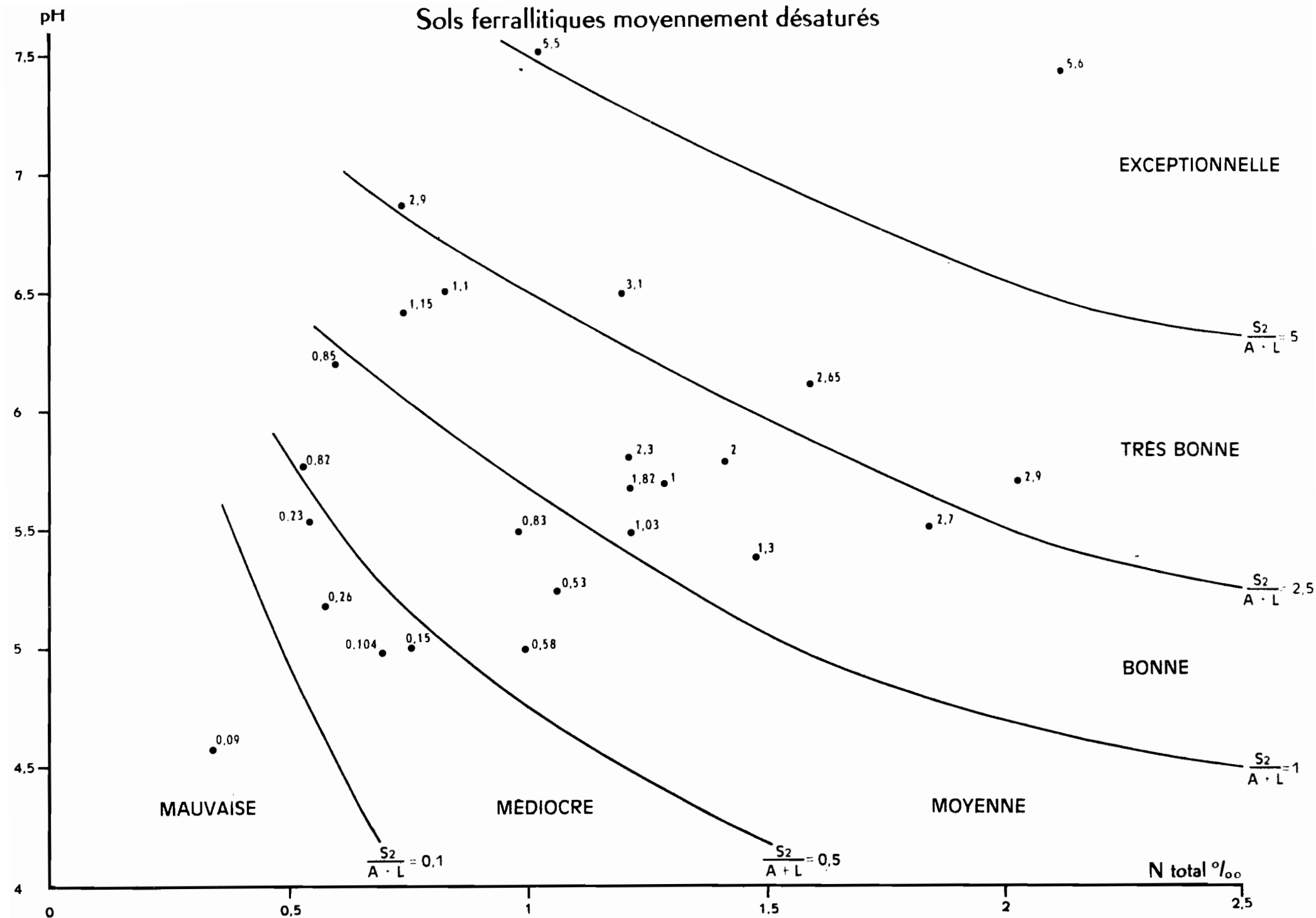


Fig. 37 - Relation entre la teneur en azote total, le pH, le rapport $S^2/A + L$ et la fertilité dans les sols ferrallitiques moyennement désaturés

Dans les sols ferrallitiques où la capacité d'échange est en grande partie fonction du taux de matière organique, divers graphiques ont été établis donnant la valeur de S en fonction du taux d'azote total et du pH, des limites de fertilité sont indiquées pour les cultures principales, mais sont applicables pour la plupart des cultures exondées dans ces sols .

Les sols ferrallitiques fortement, moyennement et faiblement désaturés présentent des normes différentes car les types d'argile ne sont pas partout les mêmes (Fig. 27 - 28 - 29). Ces abaques permettent également de juger l'homogénéité des résultats analytiques .

FORESTIER fait intervenir le rapport $\frac{S^2}{A+L}$ (somme des bases au carré fin %) (argile + limon)

En Côte d'Ivoire, la relation suivante a été établie (B. DABIN).

$\frac{S^2}{A + L}$		un graphique représente
< 0,1	mauvais	la relation entre N total
0,1 à 0,5	médiocre	et pH $\frac{S^2}{A + L}$ et fertilité
0,5 à 1	moyenne	dans les sols ferralliti-
1 à 2,5	bonne	ques typiques (Fig. 37)
2,5 à 5	très bonne	
> 5	exceptionnelle	

. Problèmes du potassium et du magnésium. Si la valeur de S dépend essentiellement de la capacité d'échange et du pH, pour les autres cations, c'est leurs proportions relatives qui jouent un rôle important dans la fertilité .

. Problème du potassium. Les études les plus récentes ont montré que le potassium " assimilable " du sol était en réalité du potassium échangeable qui pouvait être prélevé jusqu'à concurrence de 75% dans des essais Neubauer (BLANCHET, 1959), p r contre, la corrélation entre le potassium échangeable et fertilité est faible; cette corrélation devient élevée si l'on tient compte des rapports $\frac{K}{T}$ $\frac{K}{S}$ ou $\frac{K}{Ca}$.

Il semble donc que l'alimentation en potassium des plantes dépende de la densité des ions potassium par rapport aux autres cations, la vitesse de désorption du potassium échangeable étant élevée, l'énergie d'adsorption devient un facteur secondaire alors qu'il est primordial dans le cas du phosphore.

Cas particulier des sols tropicaux. Dans les sols argileux des régions semi-arides, et en particulier dans les sols d'alluvions cultivés en rizière, le besoin en potassium se fait rarement sentir, alors que les besoins en azote et parfois en phosphore sont élevés .

Par contre , dans les régions humides, en sols ferrallitiques particulièrement, les besoins en potassium sont très fréquents. Des plantes comme le caféier, le cacaoyer, le palmier à huile, etc, consomment de grandes quantités de potassium .

Exemple.

Sols ferrallitiques faiblement désaturés (pluviométrie 1400 mm) de R.C.A.

Culture du Caféier (FORESTIER 1965) - Tableau 28.

Teneur en A + L	10%	20%	55%	85%
teneur moyenne en K mé 100 g	0,1	0,18	0,4	0,65
limite de carence	0,05	0,1	0,28	0,32

MOULINIER (1962), considère que pour obtenir un bon rendement en caféier dans les sols sur sables tertiaires de basse Côte d'Ivoire, il faut au moins 0,1 mé pour 100 g de potassium.

Dans ces sols, le magnésium doit être supérieur à 1,5 mé. mais ceci essentiellement en raison du pH lié au magnésium et au calcium. De même pour la canne à sucre, 0,1 mé pour 100 g représente la limite inférieure au-dessous de laquelle il existe un besoin intense en potassium dans tous les cas.

Sols ferrallitiques fortement désaturés

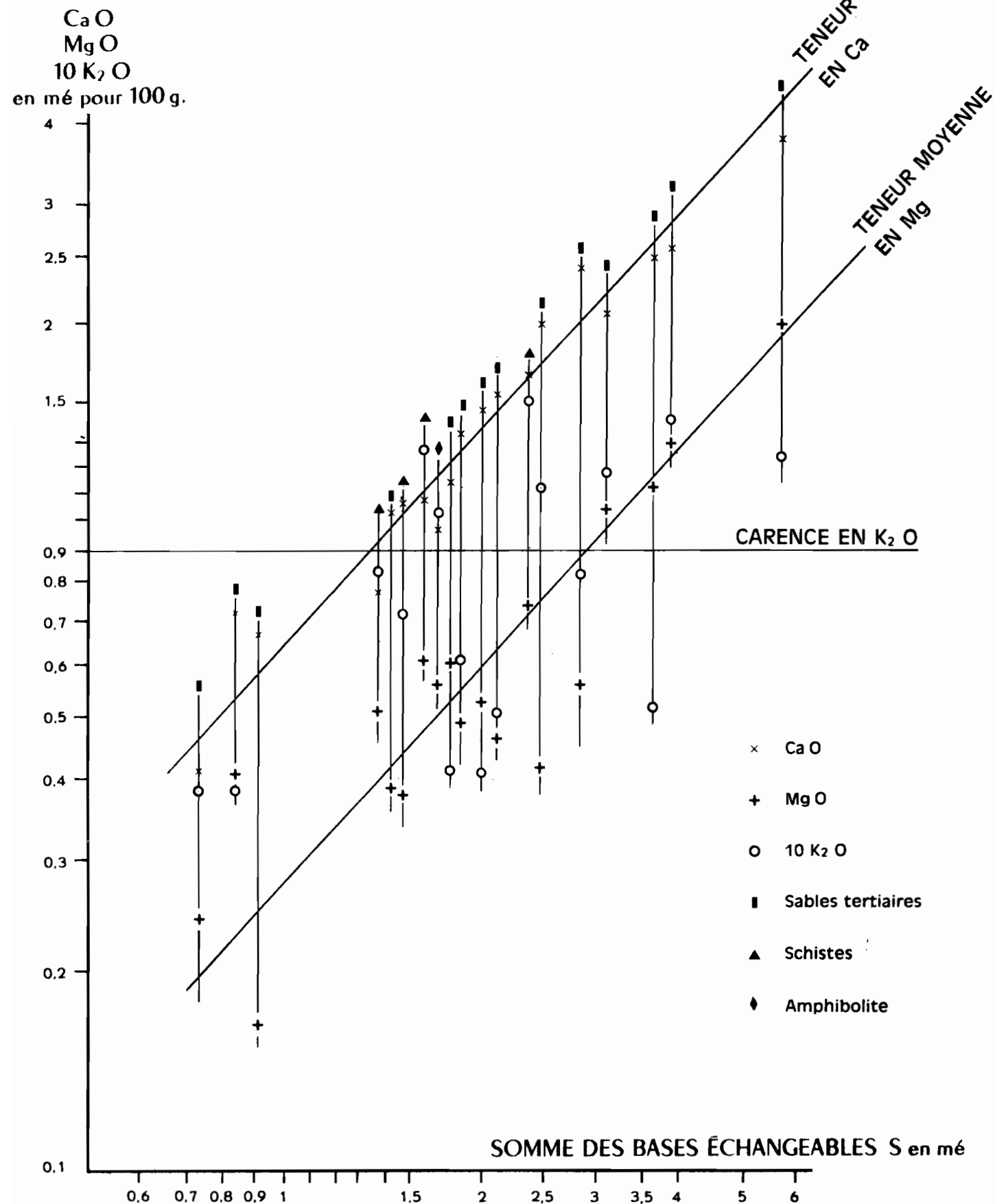


Fig. 38 - Équilibre des bases échangeables dans des sols ferrallitiques fortement désaturés.

Au-dessus de 0,1 mé, le potassium doit représenter plus de 2% de la valeur de S pour que la teneur soit considérée comme correcte. Si $S = 10$ mé pour 100 g, $K = 0,2$ mé représente une valeur moyenne .

. Equilibre Ca-Mg-K. Cet équilibre a été étudié par de nombreux auteurs, parmi lesquels on peut citer : B. DABIN sur cotonnier 1954, DUGAIN sur Bananier, FORESTIER sur caféier 1959-1960, MOULINIER sur caféier 1962, MARTIN PREVEL et COLMET-DAAGE sur bananier 1963 .

Un certain nombre d'auteurs ont réalisé des analyses de plantes concurremment avec les analyses de sols (FORESTIER-MARTIN-PREVEL).

Cas de carence en potassium. Cette carence est nette si $\frac{Mg}{K} > 15$ ou $20 \frac{Mg + Ca}{K} > 40$ ou 50. La limite peut être supérieure à 50 dans le cas des sols argileux .

Par exemple, dans les sols des Antilles sols du SIMON (MARTIN-PREVEL), il y a 20 mé calcium échangeable et 19 de magnésium échangeable, le bananier peut présenter une pourriture du rogne (dégrain) s'il y a moins de 1 mé de potassium dans le sol .

Cette limite correspond à celle indiquée précédemment pour la canne à sucre, c'est-à-dire potassium non inférieur à 2% de la somme de base .

Carence en magnésie. Inversement, dans le cas d'une teneur relativement élevée en potassium, une carence en magnésium peut apparaître si le rapport $\frac{Mg}{K}$ est inférieur à une certaine valeur.

Dans le cas du $\frac{K}{K}$ caféier, la limite semble se situer pour $\frac{Mg}{K} < 2$ (FORESTIER), dans le cas du bananier, la maladie du Bleu apparaît pour $\frac{Mg}{K} < 3$ (DUGAIN), dans le cas du cotonnier, lorsque $\frac{Mg}{K}$ est égal à 3, des apports d'engrais potassiques provoquent des dépressions de rendement (DABIN).

Echelle de fertilité par rapport au Potassium. Un rapport moyen Ca-Mg-K peut être représenté par la formule 20-10-1 (Fig. 38). Une échelle moyenne de richesse en potassium peut correspondre aux valeurs suivantes (compte tenu de toutes

les indications données précédemment).

Potassium en mé pour 100 g.

$< 0,1$	mauvais
$0,1 - 0,2$	médiocre
$0,2 - 0,4$	moyen
$> 0,4$	bon

Si $A + L \leq 10\%$ les chiffres sont à diviser par deux

Si $A + L \geq 60\%$ les chiffres sont à multiplier par deux

De très nombreux sols ferrallitiques présentent des besoins en potassium importants. En ce qui concerne la culture du palmier à huile, dans des sols ayant moins de 0,1 mé p. 100 g, l'apport de 1 kg par pied de potassium multiplie par 7 les rendements en huile; il en est de même du cocotier (Essais I. R.H.O. Côte d'Ivoire).

. Autres facteurs agissant sur l'alimentation en potassium

Un excès d'humidité dans le cas de la culture du caféier peut provoquer une carence en potassium (FORESTIER). Dans les sols acides, un chaulage peut améliorer l'alimentation potassique.

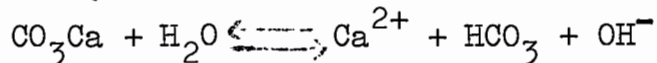
. Réserves du sol en potassium. Dans des sols contenant certaines argiles du type mica, une partie importante des réserves non échangeables en potassium peut passer à l'état échangeable. En 25 ans, les plantes peuvent prélever 25 fois la diminution du potassium échangeable. Dans des sols dont le taux de potassium échangeable est passé en 25 ans de 108 ppm à 83 ppm, les plantes ont puisé 600 ppm de potassium .

3.4. Problème des sols calcaires.

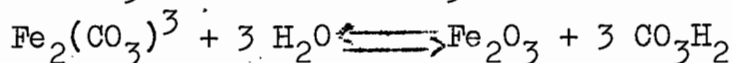
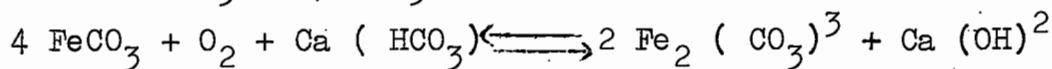
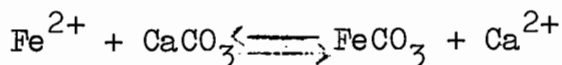
Les sols présentant un excès de carbonate de calcium, CO_3Ca , peuvent provoquer chez les végétaux des accidents de végétation dont le plus connu est la chlorose .

Il n'est pas possible de mettre en corrélation les accidents de chlorose avec la teneur en calcium total du sol. Celui-ci peut se présenter sous forme de cailloux plus ou moins durs, mais il peut exister également dans les fractions fines, limon et argile, il est alors beaucoup plus soluble. Un test assez généralement utilisé est celui du calcaire " actif " qui consiste à fixer le calcium par de l'oxalate d'ammonium .

Les sols riches en calcaire " actif " peuvent avoir un pH de l'ordre de 8,5, mais lorsque l'humidité du sol augmente, il peut y avoir une forte hydrolyse des carbonates et augmentation de l'alcalinité.



Il peut y avoir action sur le fer selon le schéma suivant:



Fe^{2+} assimilable se transforme en Fe^{3+} inassimilable. Dans tous les cas, la chlorose semble liée à la présence dans la solution du sol de fortes concentrations en Ca^{++} et en bicarbonate CO_3H .

Ces phénomènes augmentent avec l'humidité et une température trop élevée ou trop basse. On note un accroissement du potassium dans les feuilles chlorosées et une diminution du fer soluble.

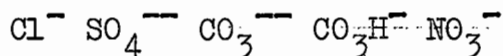
L'excès de calcium bloque le phosphore sous forme de phosphate tricalcique insoluble; le bore peut être bloqué également si $\frac{\text{B}}{\text{Ca}} < \frac{1}{1500}$, le fer devient peu assimilable au-dessus de pH = 7,6.

3.5. Problème des sols salés et à alcalis.

Le problème des sols salés et à alcalis est très complexe, il se pose aussi bien sur le plan de l'analyse des sols proprement dit que de l'interprétation des résultats dans le but de déterminer la fertilité des sols.

Définition des sols salés. Ce sont des sols qui contiennent en solution une grande quantité de sels solubles, et/ou dont le complexe absorbant peut être plus ou moins saturé en ion sodium.

Les divers anions solubles que l'on peut doser sont les suivants :



Les borates peuvent s'accumuler occasionnellement.

Les cations principaux sont Na^+ et Mg^{++} , Ca^{++} dans le cas de sols riches en gypse.

On distingue trois catégories de sols salés.

- Les sols salés proprement dits. Ils sont riches en sels solubles, la conductivité électrique de l'extrait de sol saturé est supérieure à 4 millinhos/cm. Le rapport $\frac{Na}{T}$ est inférieur à 15%, le pH est inférieur à 8,5, la structure est souvent bonne et les colloïdes bien floculés .
- Les sols salés à alcalis. Leur conductivité est supérieure à 4 millinhos/cm, le rapport $\frac{Na}{T}$ est supérieur à 15%, le pH est supérieur à 8,5, les colloïdes sont floculés.
- Les sols à alcalis non salés. La conductivité est inférieure à 4 millinhos cm, le rapport $\frac{Na}{T}$ est supérieur à 15%, le pH est supérieur à 8,5 et peut atteindre 10, les colloïdes sont dispersés et l'humus peut être solubilisé en raison de l'alcalinité et de la présence de carbonates alcalins . Les sols à alcalis peuvent être lessivés superficiellement avec formation d'un horizon B très compact, ce sont les " Solonetz solodisés ".

• Méthode d'analyse des sols salés .

Pâte saturée. La technique la plus utilisée est celle de la pâte saturée, le sol est saturé d'eau jusqu'au point de " liquidité ", la surface doit être brillante, mais de l'eau en excès ne doit pas se rassembler dans les cavités. L'humidité du sol est mesurée sur une fraction séparée. La solution du sol est extraite sous vide; sa conductivité électrique est mesurée et les anions Cl^- , SO_4^{--} , CO_3^{--} , CO_3H^- , etc, sont analysés ainsi que les cations Na^+ , K^+ , Ca^{++} , Mg^{++} .

Conductivité spécifique. Cette conductivité est mesurée à l'aide d'un pont de Wheatstone et d'une cellule de mesure comprenant des électrodes de 1 cm^2 distantes de 1 cm.

La conductivité L à 25° est exprimée en mhos cm soit

$$\frac{1}{\text{ohms/cm}}$$

$$\text{Le millinhos/cm} = \frac{1}{1000 \text{ ohms/cm}}$$

$$1 \text{ micronhos/cm} = \frac{1}{10^6 \text{ ohms/cm}}$$

Extrait 1/2. Pour des raisons d'ordre pratique, on peut remplacer l'extrait saturé à l'extrait 1/2 .

100 g de sol sont placés dans 200 cc eau; on agite, centrifuge et mesure la conductivité; on analyse anions et cations de l'extrait; on peut à partir de l'extrait 1/2 calculer la conductivité de l'extrait saturé .

$$\text{L'extrait saturé} = \text{L extrait } 1/2 \times \frac{200}{\% \text{ eau dans le sol à saturation}}$$

La dissolution du gypse est meilleure que dans l'extrait saturé, l'hydrolyse du sodium échangeable est encore faible .

concentration en sels dans le sol = concentration dans l'extrait 1/2 x 2

A côté de l'extrait 1/2, on peut réaliser l'extrait 1/5e au 1/10e.

La dissolution des sels peu solubles comme le gypse est alors complète mais il y a une forte hydrolyse du sodium échangeable . Le pH de l'extrait 1/10 est beaucoup plus alcalin que le pH de la pâte saturée. La différence de pH est en relation avec la quantité de Na échangeable .

• Echelle de salinité indiquée par DURAND .

né pour 100 g. de solution	0	2,5	5	10	20
		micromhos cm			
L à 25° C ext. 1/10		250	500	1000	2000
L à 25° C ext. 1/5		500	1000	2000	4000
L ext. saturé à 25° C		1750	3500	7000	14000
Echelle de Riverside en millimhos cm		millimhos cm			
0	2	4	8	16	
non salé	peu salé effet sur plantes sensibles seulement	salé effet sur nombreuses plantes luzerne Betterave Coton Cé- réales ré- sistantes	forte- ment sa- lé seule- ment quel- ques plan- tes tolé- rantes	très forte- ment salé flore parti- culière des terrains salés.	

Les sels solubles en dehors de leur action toxique spécifique agissent donc essentiellement par la pression osmotique qu'ils confèrent à la solution du sol.

Pression osmotique en atmosphère = $L \times 0,36$ (millimhos cm)

Pour une même teneur en sels en % de sol sec, la conductivité dépend de l'humidité du sol, c'est-à-dire de son pouvoir de rétention. Un sol argileux ou humifère a une conductivité plus faible qu'un sol sableux pour un même état d'humidité, par exemple à la capacité maxima de rétention .

% de sel dans le sol = $0,064 L \times$ % eau dans le sol à saturation.

.Action de Na échangeable .

Dans les sols salés , un équilibre s'établit entre la composition de la solution du sol et celle de son complexe absorbant qui s'enrichit en ions sodium. Lorsque la teneur en sodium échangeable du sol est élevée, la structure se dégrade et la perméabilité baisse beaucoup. C'est, le plus souvent, à partir de Na/T-12-15 % que le phénomène revient très accusé. Dans certains sols, il peut l'être déjà à partir de Na/T = 6 - 8 %. Il apparaît ainsi que le magnésium peut parfois avoir une action nocive également; dans d'autres cas, il agit, au contraire, à peu près comme le calcium .

Ces sols à alcalis, riches en sodium échangeable, ont, s'ils ne sont pas en même temps très salés, une réaction très basique. Leur pH/eau est alors de l'ordre de 8,8 à 9 et même au-delà, dès que le sol contient du carbonate de sodium. Dans ce dernier cas, le pH monte au-delà de 10 . Une réaction aussi élevée est très néfaste. Les systèmes racinaires de nombreuses plantes ne le supportent pas; par ailleurs, elle peut provoquer le blocage des divers oligo-éléments .

.Amélioration des terrains salés .Après avoir, le cas échéant, supprimé l'arrivée des eaux riches en sels (nappe phréatique, filets d'eau souterrains circulant, etc, par un drainage approprié ou par un pompage), il faut lessiver le sol par des eaux peu ou pas salées : submersion et drainage .

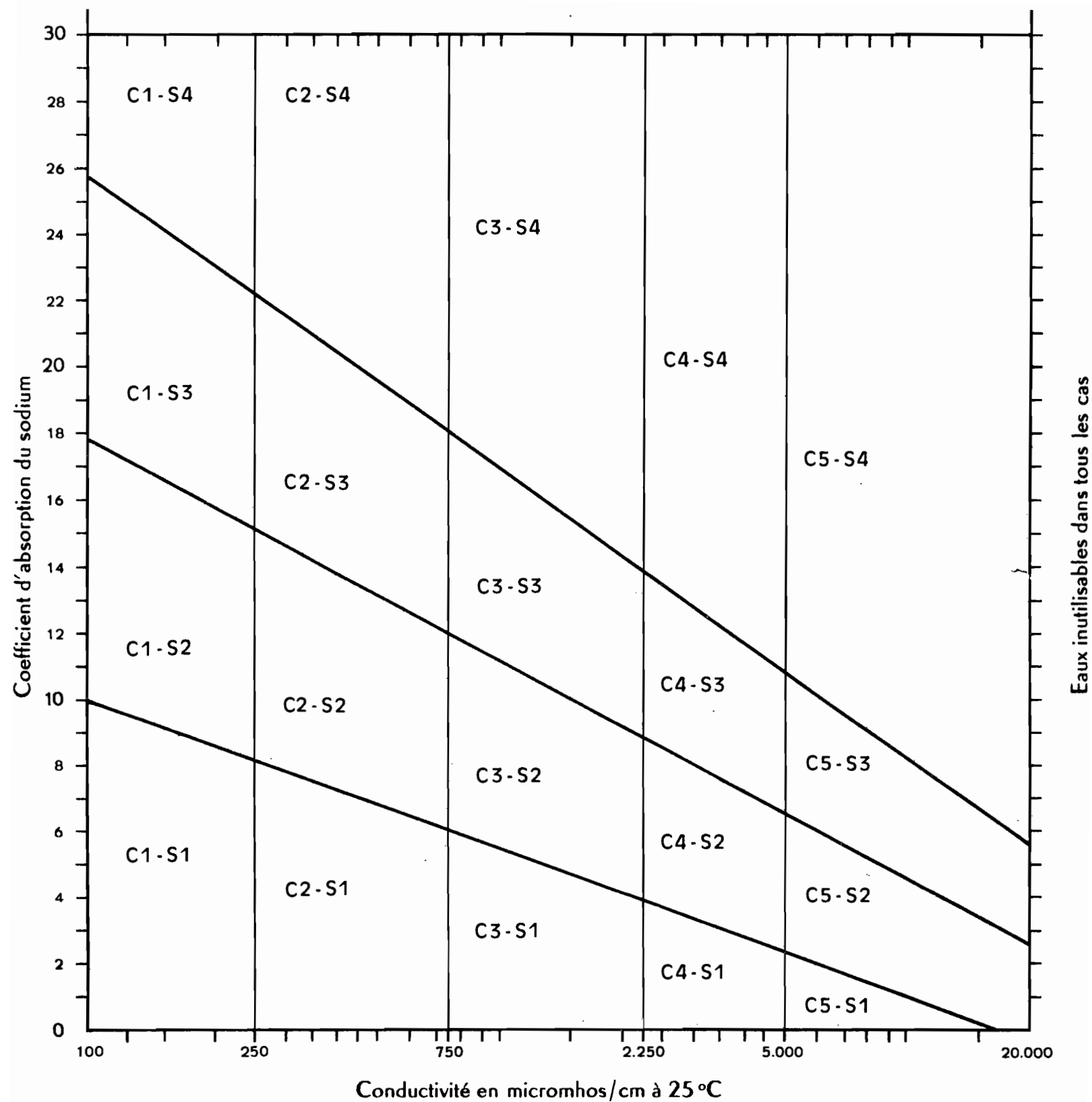


Fig. 39 - Diagramme permettant de déterminer la qualité des eaux en fonction de la conductivité et du coefficient d'absorption du sodium.

Eaux inutilisables dans tous les cas

Si le sol est riche en sodium échangeable, il faut lui apporter du gypse finement moulu (ou de la pyrite, ou parfois du soufre) pour remplacer ce sodium échangeable du complexe par du calcium .

La proportion nécessaire est calculée de façon à ramener Na/T à une valeur assez basse (si possible < 10%). Si le sol est calcaire et surtout s'il contient du carbonate de sodium , on peut utiliser de l'acide sulfurique dilué. Cet apport de gypse est combiné avec une forte irrigation et un drainage efficace. On peut faire dissoudre le gypse dans l'eau d'irrigation .

Eaux d'irrigation. Les eaux d'irrigation salées sont dangereuses pour les sols et les cultures. Les ouvrages de L. RICHARDS (du Laboratoire de Riverside, U.S.A.) et de J. DURAND donnent des renseignements précis sur leurs possibilités d'utilisation .

D'après les auteurs américains, il est indispensable d'envisager non seulement la conductivité de l'eau mais aussi sa richesse en sodium (d'après la valeur du rapport d'absorption S.A.R. = $\frac{Na^+}{\sqrt{\frac{Ca^{2+} + Mg^{2+}}{2}}}$ pour juger de sa valeur pour

l'irrigation .

La valeur de conductivité par cm^2 est 250, 750 et 2250 micromhos.

Des eaux de conductivité supérieure à 2250 micromhos ne devraient plus être utilisées . En fait, elles peuvent l'être encore, mais seulement en terrain sableux ou en terrain limoneux bien structuré et bien drainant. Des eaux de conductivité supérieure à 4 ou 5 millimhos ne sont pas très difficilement utilisables .

Plutôt que le SAR, on peut utiliser le rapport moléculaire Na/Ca des éléments contenus dans l'eau. Il n'importe pratiquement d'ailleurs que si l'eau a une conductivité supérieure à 500 micromhos (et surtout supérieure à 750 micromhos) et si la terre n'est pas sableuse ou sablo-limoneuse . Ce sont surtout les eaux dans lesquelles Na/Ca est supérieur à 1 qui présentent un danger d'alcalisation pour les terres .

4. CONCLUSION GENERALE.

Aussi bien en ce qui concerne les facteurs physiques que les facteurs chimiques de la fertilité, certaines données fondamentales de l'agronomie établies pour les régions tempérées sont applicables dans le cas des régions arides ou tropicales humides .

Néanmoins, certaines notions doivent être adaptées aux conditions particulières de climat et d'exploitation de ces régions, ainsi qu'à l'évolution particulière de leurs sols.

C'est sur ces notions particulières aux climats tropicaux que nous avons voulu insister, notamment sur la fragilité des réserves organiques et des éléments minéraux qui leur sont liés . La rapidité des métabolismes biologiques et l'intense pouvoir de dégradation de l'érosion conduit à donner plus d'importance à la notion de " réserves ", d'autre part s'il est possible d'utiliser des sols à faible potentiel chimique, il y a des limites inférieures au-dessous desquelles il ne faut pas descendre, enfin l'amélioration de ce potentiel par des engrais et amendements peut conduire à des résultats très spectaculaires, qui sont encore actuellement des cas isolés mais qui constitueront cependant un facteur de progrès considérable de l'agriculture tropicale au fur et à mesure que l'ensemble des techniques culturales se perfectionneront .

B I B L I O G R A P H I E

- ADJANOHOOUN (E.) - 1964 - Végétation des savanes et des rochers découverts en Côte d'Ivoire Centrale . Mém. ORSTOM n° 7. Paris, 219 p.
- AHN (P.M.) - 1959 - Soil - vegetation relationships in the western forest areas of Ghana. Sols et végétation des régions tropicales. Travaux Coll. Abidjan. Unesco, Recherches sur la zone tropicale humide. Paris, pp. 75-84 .
- AUBERT (G.) - 1959 - Influence de divers types de végétation sur les caractères et l'évolution des sols en régions équatoriales ainsi que leurs bordures tropicales semi-humides. Sols et végétation des régions tropicales. Travaux Coll. Abidjan. Unesco, Recherches sur la zone tropicale humide. Paris, pp. 41-47.
- AUDRY (P.) - 1965 - Premiers résultats partiels d'une étude d'évolution des sols comparée au Tchad . Coll. Conserv. Annal. Fertil. sols Khartoum 96-112.
- BEADLE (N.C.W.) - 1966 - Soil phosphate and its role in molding segment of the australian flora and vegetation, with special reference to xeromorphy and sclerophylly. Ecology, vol. 47, n° 6, pp. 992-1007 .
- BERGER (J.M.) - 1964 - Interprétation des résultats des analyses des échantillons de terre pour le centre de la Côte d'Ivoire. Station centrale d'Expérimentation agricole, Bouaké, IV-31 p. multigr.
- BOSSER (J.), RIQUIER (J.) - 1952 - Notice sur les cartes d'utilisation des sols . Feuille de Kianjasoa. I.R.S.M., Tananarive, carte au 1/20.000°.
- BOSSER (J.), ROCHE (P.) - 1956 - Notices sur les cartes d'utilisation des sols. 1. Feuille d'Andilanena. I.R.S.M., Tananarive, 24 p., carte au 1/40.000° .
- BOUYER (S.) - 1958 - Corrélation entre les résultats culturaux et les teneurs en phosphore du sol dans le cas des sols ferrugineux tropicaux du Sénégal. Int. Soc. Soil Science. Commissions II et IV° 1958. Hamburg, vol. II, pp.244-249.
- CHAMPION (J.), DUGAIN (F.), MAIGNIEN (R.), DOMMERGUES (Y.) - 1958 - Les sols de bananeraies et leur amélioration en Guinée. Fruits, vol. 13, n° 9-10, pp. 415-462.
- CHAMPSOLOIX (R.) - 1960 - Le ray dans quelques villages des Hauts Plateaux du Viet-Nam. in : Rapports du sol et de la végétation. Premier Coll. Soc. Bot. de France. Paris, 13 Juin 1959. Masson, Paris, pp. 46-62.

- COMBEAU (A.), OLLAT (C.), QUANTIN (P.) - 1961 - Observations sur certaines caractéristiques des sols ferrallitiques. Relations entre les rendements et les résultats d'analyses des sols. Fertilité, n° 13, pp. 27-39.
- COMBEAU (A.), QUANTIN (P.) - 1964 - Observations sur les relations entre stabilité structurale et matière organique dans quelques sols d'Afrique Centrale. Cah. ORSTOM sér. Pédol., vol. II, n° 1, pp. 3-11.
- DABIN (B.) - 1954 - Les problèmes d'utilisation des sols à l'Office du Niger. Conf. Interafr. Sols. 2. 1954. Léopoldville, vol. II, pp. 1165-1176.
- DABIN (B.) - 1956 - Interprétation agronomique des analyses de sols, cas particulier de l'Azote et du Phosphore. Congr. Int. Sci. Sol. 6. 1956. Paris, vol. D, pp. 403-409.
- DABIN (B.) - 1956 - Contribution à l'étude de la fertilité des terres de Barre. Agron. trop., t. XI, n° 4, pp. 490-506.
- DABIN (B.) - 1961 - Les facteurs de fertilité des sols des régions tropicales en culture irriguée. Bull. Ass. Etude Sol, n° spécial, pp. 108-130.
- DABIN (B.) - 1962 - Relations entre les propriétés physiques et la fertilité dans les sols tropicaux. Ann. agron., vol. 13, n° 2, pp. 111-140.
- DABIN (B.) - 1962 - Utilisation des études pédologiques pour la détermination du potentiel de fertilité des sols tropicaux. Bull. techn. Inform. Ingénieurs Serv. agric., n° 172, pp. 1-8.
- DABIN (B.) - 1962 - Etude pour la reconversion des cultures de Caféier dans la République de Côte d'Ivoire. Pédologie. BDPA-ORSTOM, Paris, 2 vol., 333 p. multigr.
- DABIN (B.) - 1963 - Appréciation des besoins en phosphore dans les sols tropicaux. Les formes du phosphore dans les sols de Côte d'Ivoire. Cah. ORSTOM sér. Pédol., n° 3, pp. 27-42.
- DABIN (B.) - 1964 - Analyse physique et fertilité dans les sols des régions humides de Côte d'Ivoire. Cah. ORSTOM sér. Pédol., vol. II, fasc. 1, pp. 29-40.
- DABIN (B.) - 1964 - Etude des formes du phosphore dans quelques sols des Antilles. Action sur l'alimentation phosphatée de la canne à sucre, Cah. ORSTOM sér. Pédol. Vol. II, fasc. 2, pp. 5-12.
- DABIN (B.) et LENEUF (N.) - 1960 - Les sols de Bananeraies de la Côte d'Ivoire. Fruits vol. 15, n° 1, pp. 3-27; n° 2, pp. 77-88; n° 3, pp. 117-127.

- DANSEREAU (P.) - 1952 - The varieties of evolutionary opportunity. Rev. can. Biol., II, 4, pp. 305-388.
- DURAND (J.H.) - 1965 - Technique utilisable pour dresser les cartes de mise en valeur des sols. IRAT, Nogent/Marne, 20 p. multigr.
- DUVIGNEAUD (P.), DENAEYER-DE SMET (S.) - 1960 - Action de certains métaux lourds du sol (cuivre, cobalt, manganèse, uranium) sur la végétation du Haut-Katanga. in : Rapports du sol et de la végétation. Premier Coll. Soc. Bot. de France. Paris, 13 juin 1959. Masson, Paris, pp. 121-139.
- FERRI (M.G.) - 1959 - Aspects of the soil-water-plant relationships in connexion with some brazilian types of vegetation. Sols et végétation des régions tropicales. Travaux Coll. Abidjan. Unesco, Recherches sur la zone tropicale humide. Paris, pp. 103-109.
- FORESTIER (J.) - 1959-1960 - Fertilité des sols des Caféières en République Centrafricaine. Agron. trop., t. XIV, n° 3, pp. 306-348 ; t. XV, n° 1, pp. 9-37.
- HENIN(S.) - 1960 - Le profil cultural. SEIA, Paris, 320 p.
- KOECHLIN (J.) - 1961 - La végétation des savanes dans le Sud de la République du Congo. Mém. ORSTOM n° 1. Paris, 310 p.
- LE HOUEROU (H.N.) - 1962 - Recherches écologiques et floristiques sur la végétation de la Tunisie méridionale. 1ère partie. Les milieux naturels, la végétation. Thèse 1959. Mém. Inst. Rech. Saharienne. H.S. n° 6. Alger, 283 p.
- LEMEE (G.) - 1959 - Effets des caractères du sol sur la localisation de la végétation en zones équatoriale et tropicale humide. Sols et végétation des régions tropicales. Travaux Coll. Abidjan. Unesco, Recherches sur la zone tropicale humide. Paris, pp. 25-39.
- LENEUF (N.), MANGENOT (G.) - 1960 - Un exemple de relations entre les sols et la végétation dans les Tropiques humides : la Côte d'Ivoire. in : Rapports du sol et de la végétation. Premier Coll. Soc. Bot. de France. Paris, 13 juin 1959. Masson, Paris, pp. 87-92 .
- LEPOUTRE (B.) - 1965 - Ecologie de la régénération naturelle du cèdre dans le Moyen-Atlas marocain. Thèse. Univ. Montpellier. Fac. Sci., XI-109 p.
- LONG (G.) - 1954 - Contribution à l'étude de la végétation de la Tunisie Centrale. Ann. Serv. bot. agron. Tunisie, vol. 27, pp. 1 - 388 .

- MARTIN-PREVEL (P.) - 1963 - Le bilan minéral, base d'interprétation du diagnostic foliaire. I.F.A.C. Journées d'étude sur la nutrition minérale des plantes fruitières tropicales et subtropicales . 1963 . Paris, pp. 67-85.
- MONK (C.D.) - 1966 - An ecological significance of the evergreeness. Ecology, Vol.47, n° 3, pp. 504-505.
- MOULINIER (H.) - 1962 - Contribution à l'étude agronomique des sols de basse Côte d'Ivoire. Institut Français du Café et du Cacao. Bull n° 3, 70 p.
- NYE (P.H.) - 1959 - Some effects of natural vegetation on the soils of West Africa and on their development under cultivation. Sols et végétation des régions tropicales. Travaux Coll. Abidjan. Unesco, Recherches sur la zone tropicale humide . Paris, pp. 59-63.
- PIRES (J.M.) - 1964 - The estuaries of the Amazon and Diapoque rivers and their floras. Les problèmes scientifiques des deltas de la zone tropicale humide et leurs implications. Actes Coll. Dacca. Unesco, Recherches sur la zone tropicale humide. Paris, pp. 211-218.
- PORTERES (R.) - 1960 - Les sols et leurs plantes indicatrices en agronomie tropicale. in : Rapports du sol et de la végétation. Premier Coll. Soc. Bot. de France. Paris, 13 juin 1959. Masson, Paris, pp. 150-154.
- RICHARDS (L.A.) Edit. - 1954 - Diagnosis and improvement of Saline and alkali Soils U.S.D.A. Afric. Handbook 60 160 p.
- RICHARDS (P.W.) - 1957 - The tropical rain forest. Cambridge Univ. Press.
- RICHARDS (P.W.) - 1959 - The types of vegetation of the humid tropics in relation to the soil. Sols et végétation des régions tropicales. Travaux Coll. Abidjan. Unesco, Recherches sur la zone tropicale humide. Paris, pp. 15-21.
- SCHMID (M.) - 1960 - Influence de la végétation sur la conservation du sol et sur la restauration de la fertilité des terres en zone intertropicale humide. in : Rapports du sol et de la végétation. Premier Coll. Soc. Bot. de France. Paris, 13 juin 1959. Masson, Paris, pp. 28-45.
- SCHMID (M.) - 1962 - Contribution à la connaissance de la végétation du Viet-Nam : le Massif Su-Annamitique et les régions linitrophes. Thèse. Orsay, 426 p. multigr.
- SCHMID (M.) - 1964 - Aperçu sur la végétation occupant les alluvions récentes de la partie méridionale de l'Indochine. Les problèmes scientifiques des deltas de la zone tropicale humide et leurs implications. Actes Coll. Dacca. Unesco, Recherches sur la zone tropicale humide. Paris, pp. 235 - 241 .

- SEGALEN (P.) - 1960 - L'étude de la végétation et la prospection pédologique. Cas particulier de l'Ouest et du Nord-Ouest de Madagascar. in : Rapports du sol et de la végétation. Premier Coll. Soc. Bot. de France. Paris, 13 Juin 1959. Masson, Paris, pp. 155-159 .
- SIMONNEAU (P.) - 1960 - Influence de la salinité sur les plantes et les cultures en Afrique du Nord. in : Rapports du sol et de la végétation. Premier Coll. Soc. Bot. de France. Paris, 13 juin 1959. Masson, Paris, pp. 140-149.
- SPECHT (R.L.), GRIVES (R.H.) - 1966 - A comparison of the Phosphorus nutrition of australian heath plants and introduced economic plants . Austr. J. Bot., vol. 14, n° 2, pp. 201-221 .
- TERCINIER (G.) - 1962 - Les sols de la Nouvelle Calédonie. Cah. ORSTOM sér. Pédol., n° 1, 51 p.
- TROCHAIN (J.L.) - 1940 - Contribution à l'étude de la végétation du Sénégal. Mém. IFAN n° 2. Larose, Paris , 433 p.
- WALTER (H.) - 1964 - Die Vegetation der Erde in öko-physiologischer Betrachtung I. Die tropischen und subtropischen Zonen. Gustav Fischer, Jena
- WEBB (L.J.) - 1965 - The influence of the soil parent materials on the nature and distribution of Rain Forests in South Queensland. Symposium on ecological research in humid tropics vegetation. 1963. Kuching, Sarawak. Government of Sarawak, Unesco, Kuching, pp. 3 - 14 .

Cinquième Partie

Dans cette partie qui comprend trois chapitres, sont étudiés successivement les grandes tendances de la pédogenèse en milieu tropical (argilification, accumulation de matière organique, de calcaire, d'hydroxydes, hydromorphie, halomorphie) puis la classification des sols. Si un accent particulier est mis sur la classification française, les classifications étrangères sont également envisagées. Le dernier chapitre est consacré à la cartographie pédologique.

La bibliographie concernant cette partie est particulièrement abondante puisque tous les grands ouvrages classiques concernent la pédogénèse et traitent plus ou moins longuement de la pédogenèse tropicale. En particulier ceux de AUBERT, DUCHAUFOR, KELLEY, MILLOT, MOHR et VAN BAREN, RODE, VILENSKII, etc. Par ailleurs, l'auteur a eu la possibilité de connaître les travaux du C.P.C.S. et du G.E.P.P.A. qui, même s'ils ne sont pas encore imprimés ont déjà orienté les travaux pédologiques effectués en France et Outre-Mer.

C.P.C.S. : Comité de Pédologie et de Cartographie des Sols.

G.E.P.P.A. : Groupe d'Etude des Problèmes de Pédologie Appliquée.

C h a p i t r e 11

LES GRANDES TENDANCES DE LA PEDOGENESE EN ZONES INTERTROPICALE ET MEDITERRANEENNE

Les processus de Formation du sol.

11.1. GENESE DES MINERAUX ARGILEUX.

11.2. ACCUMULATION DE LA MATIERE ORGANIQUE.

11.3. ACCUMULATION DES HYDROXYDES.

3.1. Ferrallitisation.

3.2. Persiallitisation.

3.3. Induration.

11.4. ACCUMULATION DU CALCAIRE.

11.5. MIGRATION DE SUBSTANCES SOLUBLES ET NON SOLUBLES.

5.1. Non solubles.

5.2. Solubles.

11.6. HYDROMORPHIE.

11.7. HALOMORPHIE. SOLS SALINS ET SOLS A ALCALIS.

11.8. AUTRES PROCESSUS. LE REMANIEMENT DES SOLS.

Un certain nombre de processus de formation du sol intéressent de façon importante les sols des régions méditerranéenne et intertropicale. La plupart de ces processus sont communs à beaucoup de zones du globe, comme la formation des minéraux argileux, la migration des substances solubles et non solubles, la formation du gley, etc. D'autres processus prennent, dans la partie du globe envisagée, une importance considérable tant par l'intensité du phénomène que par l'étendue concernée; il s'agit par exemple de l'accumulation des sesquioxides, du calcaire, etc. Un processus dont il est fait peu mention, le remaniement sera présenté également.

11.1. LA GENESE DES MINERAUX ARGILEUX.

Les différentes origines des argiles. (cf. MILLOT, 1964)

Les minéraux argileux s'observent dans les roches comme dans les sols. L'examen de ces produits indique qu'il s'agit souvent des mêmes espèces minérales et que les différences que l'on peut observer portent davantage sur leur degré de cristallinité que sur leur nature.

Dans les grandes catégories de roches sédimentaires, les argiles figurent soit comme constituant essentiel, soit comme constituant accessoire et fonctionnent comme liant d'éléments différents, ou comme une impureté.

Les argiles existent dans des dépôts glaciaires, éoliens, fluviatiles, des dépôts de piedmont. Il s'agit dans tous ces cas de matériaux formés ailleurs et qui ont été transportés dans le lieu où on les observe par un agent tel que le vent, l'eau, la glace, etc. Ils ont pu être transportés dans des lacs, des mers, etc. Le transport qu'ils ont subi n'a pas sensiblement modifié leur nature. Ce sont alors des matériaux hérités, dont la taille, la cristallinité ont été modifiées, mais non la nature.

Cependant, certains minéraux subissent pendant le transport et dans le nouveau milieu où on les observe, des modifications qui peuvent être positives : c'est l'agradation, ou négatives : c'est la dégradation. Le minéral primitif subit des "transformations" qui sont susceptibles d'apporter des modifications significatives mais non très importantes au réseau primitif. Ces transformations ont pu être étudiées dans certains bassins de sédimentation, aux USA, en France, en Afrique.

Une troisième possibilité est la synthèse de produits argileux à partir d'ions de substances dissoutes. Les produits nouveaux créés sont fortement influencés par le milieu où s'est faite la réaction. La sépiolite et l'attapulgite, par exemple, correspondent à une synthèse en milieu marin chaud et sursaturé.

Une dernière possibilité est celle où un matériau a été fortement modifié par l'action d'une eau chaude ou sous pression. Il y a alors également synthèse dite hydrothermale. Certains matériaux évoluent sous l'eau, par action d'une eau acide ou alcaline. Il y a encore synthèse car les produits argileux nouveaux n'ont pu se constituer qu'après destruction complète du matériau préexistant.

L'origine des argiles du sol peut résulter d'un des modes évoqués plus haut, mais la synthèse est la plus courante en zone intertropicale.

Genèse des argiles du sol.

L'examen d'un profil de sol montre que, dans la plupart des cas, le passage graduel de la roche consolidée, et ne renfermant pas d'argile, au sol, s'accompagne de l'apparition de ce produit. Ce processus, qu'on peut qualifier d'"argilification" est une caractéristique essentielle de la pédogénèse. Elle est tellement banale qu'on la signale à peine dans les processus de formation du sol. Il est important cependant de la connaître car l'apparition des minéraux argileux est caractéristique de certaines conditions d'environnement. Inversement, la présence de certains minéraux dans les sols, permet de comprendre leur mode de formation.

Dans la zone intertropicaleafricaine, l'héritage joue un rôle limité. En effet, en zone humide, les roches sédimentaires sont relativement peu importantes, à l'exception de la frange côtière ouest et de parties importantes du Congo et du Gabon ; l'hydrolyse est très forte, et s'accompagne à peu près partout de synthèse. En zone relativement sèche, on peut avoir héritage dans le cas de sols dérivés de roche sédimentaire ou bien synthèse dans le cas d'autres roches-mères.

Dans la zone méditerranéenne, il y a plus souvent héritage que synthèse car les conditions d'altération des minéraux des roches sont réduites du fait d'une pluviométrie modeste tombant le plus souvent en période fraîche. De plus, il s'agit de roches sédimentaires qui transmettent le plus souvent au sol le minéral argileux qu'elles contiennent.

Synthèse des minéraux argileux dans les sols.

a. Éléments structuraux des minéraux.

Les minéraux des roches qui servent à la synthèse des argiles sont essentiellement des silicates d'alumine, de fer, magnésie, potasse, soude.. Ils sont constitués d'édifices contenant deux types d'éléments de base : les tétraèdres où un petit ion Si^{4+} est entouré de quatre gros oxygène et les octaèdres où des ions plus gros Al^{3+} , Fe^{2+} , Fe^{3+} , Mg^{2+} sont entourés d'oxygène. Parfois, dans ces minéraux, Al peut prendre la place de Si dans un tétraèdre. Les alcalins et alcalino-terreux jouent le rôle de liaisons entre ces différents éléments fondamentaux.

Les combinaisons entre tétraèdres et octaèdres sont très variables. Les plus communes sont celles réalisées par :

- Les péridots : tétraèdres isolés.
- Les grenats : tétraèdres reliés deux par deux.
- Les pyroxènes et amphiboles formant des chaînes simples ou doubles de tétraèdres.
- Les micas constituant un feuillet où deux couches de tétraèdres enserrant une couche d'octaèdres.
- Les feldspaths, le quartz où les assemblages de tétraèdres réalisent un réseau tridimensionnel.

Les minéraux argileux du sol réalisent des structures en feuillets à plusieurs couches : deux (une couche octaédrique, une couche tétraédrique) ou trois (une couche octa et 2 couches tétraédriques) ou quatre (un ensemble du type précédent + une couche octaédrique). Les différences (exception faite des micas) de structure sont telles dans les deux ensembles de minéraux, que l'on ne peut passer de l'une à l'autre sans envisager une destruction complète des premiers pour reconstruire l'autre. D'où la nécessité de synthèse.

b. Conditions de formation des minéraux.

MILLOT (1964) a défini un certain nombre de milieux de genèse que l'on peut ramener à deux fondamentaux :

- Le milieu lessivé est un milieu ouvert, où l'eau circule bien. Les produits résultant de la dissolution, de l'hydrolyse des minéraux primaires sont exportés hors du profil.

Ceci peut se produire sur n'importe quelle roche-mère : basalte, granite, calcaire, etc. à condition qu'une perméabilité suffisante assure l'évacuation des eaux de pluie. Dans ces conditions, les bases, la silice dissoute sont évacuées et l'on voit s'accumuler des hydroxydes de fer et d'alumine. Si le drainage est légèrement ralenti, il y a possibilité de réaction entre la silice et l'alumine pour former un minéral argileux du type kaolinite. C'est dans ces conditions qu'apparaissent les minéraux des sols ferrallitiques.

On peut avoir un lessivage restreint. La quantité d'eau percolante est nettement plus faible que dans le cas précédent. Les bases, la silice ne sont pas aussi fortement évacuées que dans le cas précédent. Le pH est plus élevé. Le milieu est favorable à la genèse d'argiles à trois couches (illites ou montmorillonites) qui peu à peu prennent le pas sur la kaolinite. Il n'y a plus d'hydroxydes d'aluminium, mais possibilité d'hydroxydes de fer qui, eux aussi, peuvent disparaître pour entrer dans des réseaux silicatés. C'est dans ces conditions qu'apparaissent les minéraux des sols fersiallitiques.

- Le milieu est confiné. Les solutions ne sont pas évacuées convenablement par gravité, mais essentiellement par évaporation. Les produits de l'hydrolyse sont bloqués sur place et peuvent recevoir des apports en solution provenant de points de situation plus élevée (silice et bases). Le pH est généralement assez élevé. Les minéraux formés sont le plus souvent à trois couches et de type montmorillonitique. L'accumulation d'alumine libre ne se produit pas ; le fer entre le plus souvent dans des réseaux silicatés. On peut assister à la formation de sels de calcium ou sodium. Des carbonates apparaissent lorsque les ions alcalins ou alcalino-terreux ne sont pas évacués et peuvent venir en contact avec du gaz carbonique. C'est dans ces conditions que se forment les argiles des vertisols, et des sols halomorphes.

c. Les minéraux de quelques grandes catégories de sols des régions tropicales et méditerranéennes.

1. Les sols ferrallitiques sont formés sous des climats équatoriaux ou tropicaux humides, une végétation forestière, à partir des roches-mères les plus variées. Les minéraux formés résultent toujours de synthèse dans des conditions de lixiviation intense à pH acide. Tous les silicates primaires sont hydrolysés et leurs éléments servent à synthétiser kaolinite, gibbsite, goethite ou hématite. Dans le cas de roches

calcaires et dolomitiques, les carbonates de calcium et magnésium sont préalablement dissous et les minéraux argileux s'organisent à partir du résidu silicaté de la roche.

2. Les sols fersiallitiques sont formés sous des climats tropicaux à saison sèche marquée, ou méditerranéens sous une végétation arborée beaucoup moins importante que précédemment et également à partir de roches-mères très variées. Les quantités d'eau disponibles pour la lixiviation sont beaucoup plus faibles que précédemment ; elles sont parfois difficilement évacuées.

Les minéraux argileux sont le plus souvent des minéraux à deux couches, sans produits alumineux libres, mais on voit également des minéraux à trois couches. Les hydroxydes de fer peuvent être abondants mais présenter une tendance marquée à entrer dans des réseaux des minéraux argileux.

En région méditerranéenne, la montmorillonite paraît un minéral souvent synthétisé. Les sols dérivés de calcaires renferment plutôt des minéraux hérités de la roche et non des minéraux de synthèse, d'où la grande variété de minéraux observés (kaolinite, illite, montmorillonite).

3. Les vertisols sont formés dans des zones à drainage médiocre ou l'évaporation est importante. Le confinement y est la règle. Les minéraux sont des minéraux de synthèse. La montmorillonite domine sur la kaolinite ; le fer est le plus souvent inclus dans les réseaux argileux. Les carbonates de calcium apparaissent.

4. Les sols isohumiques ou calcomagnésimorphes sont à dominance de minéraux à trois couches ; les hydroxydes libres sont rares ou peu abondants.

5. Les sols halomorphes, où le drainage est très souvent médiocre, contiennent le plus souvent des smectites, associées ou non à des carbonates alcalins ou alcalino-terreux.

6. Les sols peu évolués. Ces sols se rapprochent de ceux qui prévalent dans les sols évolués de la zone où l'observation a été faite mais dans certains cas, il existe des minéraux particuliers comme les allophanes qui dominent. Il s'agit de sols Ando dérivant de roches vitreuses (cendres volcaniques).

11.2. L'ACCUMULATION DE LA MATIERE ORGANIQUE DANS LES SOLS.

La matière organique présente dans un sol provient d'apports constants de produits d'origine végétale sur le sol (chute de branches, feuilles), mort des racines dans le sol, restes de protoplasmes bactériens ; d'origine animale : cadavres ou déchets d'animaux de toute sorte.

À peine arrivés sur ou dans le sol, ces produits organiques sont soumis à deux processus très différents :

- a. La minéralisation qui est la transformation de toute substance organique en produits gazeux ou solubles tels que gaz carbonique, ammoniacque, acide nitrique.
- b. L'humification qui est la transformation de la matière organique en produits complexes de nature colloïdale relativement stables. Ces produits humifiés peuvent, à leur tour, se minéraliser mais beaucoup plus lentement.

Dans tous les sols, la matière organique observée constitue un équilibre entre les produits bruts, les produits en voie de minéralisation, les produits humifiés et les produits en solution.

Toutes les transformations subies par la matière organique sont le résultat de l'action de microorganismes qui attaquent, modifient la matière organique. Ces microorganismes sont extrêmement variés et réagissent à des conditions particulières de pH, d'aération, pour assurer leur développement optimum et par conséquent favorisent l'obtention et le maintien de tel ou tel produit.

Facteurs influençant l'accumulation de la matière organique.

Les facteurs climatiques (pluie et température) sont parmi les plus importants. Il a été observé depuis longtemps qu'une température et pluviométrie élevées se traduisaient par une accumulation modérée de matière organique dans les sols. Dans toute la zone tropicale humide et équatoriale, malgré un développement remarquable de la végétation, les teneurs en matière organique du sol sont modestes et ne dépassent pas 2 à 3 %. La pénétration de la matière organique est très peu importante et n'intéresse guère plus de 20 cm à l'exception des sols sableux où elle peut être beaucoup plus forte (Côte d'Ivoire méridionale ou Congo, etc). Ceci apparaît dû au fait que forte température, humidité et aération favorables à la minéralisation sont réunies.

A mesure qu'on s'élève en altitude, la température diminue régulièrement sans que, pour autant, il y ait diminution de la pluviométrie. Suivant les endroits, l'altitude à atteindre pour que l'on note une augmentation importante de la matière organique est variable. Au centre de Madagascar, il faut dépasser 1.400m, au Mexique oriental 8 à 900 m suffisent. Les conditions locales de pluviométrie, de nébulosité, ensoleillement sont alors très importantes. On aboutit alors à des sols présentant des teneurs importantes en matière organique (jusqu'à 20 ou 30 %) sur des épaisseurs souvent fortes (1 m).

La longueur des périodes humides, l'alternance des périodes sèches et humides peuvent être tenues pour responsables de la composition de la fraction humifiée.

A mesure qu'on s'éloigne des zones humides pour atteindre les zones semi-arides et arides, la faiblesse de la pluviométrie diminue l'approvisionnement en matière organique. Le peu qui est apporté au sol est rapidement minéralisé pendant la courte saison des pluies.

Dans la zone méditerranéenne où la pluie tombe en hiver, il n'y a qu'une accumulation modeste de la matière organique.

Le drainage a un rôle important sur la matière organique. Un ralentissement même temporaire du drainage contrarie l'action des organismes aérobies et favorise les réductions. Une augmentation des teneurs en humus est très rapidement visible, associée à une augmentation du rapport C/N. A mesure que la longueur de la période où le drainage est réduit augmente, on assiste à une augmentation de la teneur en matière organique.

Lorsque l'engorgement par l'eau est complet pendant une partie de l'année, suivi par une période oxydante même assez brève, il y a formation d'un véritable anmoir où la matière organique étroitement associée à l'argile a une structure très fine, un toucher gras et salissant.

Lorsque cet engorgement est constant, la matière organique s'accumule sans subir de modification très importante et prend la forme de tourbe où, à côté de produits décomposés, existent des débris végétaux de toutes sortes encore très reconnaissables.

Le type de végétation a, en zone intertropicale, un rôle assez secondaire. En effet, la végétation est étroitement reliée aux conditions climatiques. Elle apporte au sol la matière organique qui évolue ensuite en fonction des conditions ambiantes locales. La composition floristique modifie généralement peu la matière organique. Par exemple, au Mexique, on a pu observer des pinèdes sur des sols ferrallitiques. Par contre, en altitude, au Vietnam, les pins favorisent un début de podzolisation se superposant à la ferrallitisation.

Dans presque tous les cas observés, le remplacement de la forêt par la savane, la mise en culture de zones forestées, se traduisent par une diminution brutale des teneurs en matière organique. Ceci peut être attribué à plusieurs causes qui résultent d'un approvisionnement plus faible en matière organique, du passage répété des feux, d'un appauvrissement en bases et par un renforcement de l'érosion en nappe.

Le remplacement d'espèces par d'autres peut amener des modifications notables de certaines propriétés de la matière organique et entraîner des changements de la morphologie du sol.

La nature des roches-mères oriente également de manière importante la nature de l'accumulation organique. Les roches riches en bases ont presque toujours des horizons humifères plus développés que ceux qui dérivent de roches acides plus pauvres en calcium et magnésium, mais aussi plus riches en soude et (ou) en potasse.

Cette abondance en calcium a pour effet de remonter légèrement le pH, d'augmenter et bloquer les acides humiques particulièrement abondants dans les sols dérivés de basalte par exemple. Dans une même région, les sols placés côte à côte et dérivés de roches-mères différentes ont d'autant plus de matière organique qu'il y a plus de calcium dans les roches. Ceci est particulièrement visible à Madagascar ainsi qu'en République Centrafricaine.

La nature des minéraux argileux du sol intervient également. Il ne semble pas qu'il y ait une affinité particulière entre la kaolinite ou l'illite et la matière organique. Il y a certes des liaisons qui interviennent pour former le complexe argilo-humique. Cependant, en ce qui concerne la montmorillonite, il n'en est pas de même. On a montré depuis longtemps au laboratoire qu'on pouvait fabriquer des complexes organiques de la montmorillonite. Les produits organiques peuvent s'introduire entre les feuillets de ce minéral, ce qui n'est pas le cas pour d'autres. Les sols à mont-

morillonite ont très souvent des colorations noires intenses et des liaisons argile-matière organique très difficiles à détruire.

Il existe également des associations très étroites entre les allophanes et la matière organique. Dans les sols "ando", les teneurs en matière organique sont souvent très élevées sans qu'on puisse toujours invoquer une cause climatique ou autre.

L'action de l'homme enfin sur la matière organique est particulièrement frappante. Lors du défrichement d'une parcelle boisée ou enherbée, le moyen le plus fréquemment utilisé est le feu qui déclenche les processus de dégradation bien connus. L'action de l'homme est rarement améliorante ou plus simplement conservatrice dans ce domaine. Ce n'est que dans le cas d'une agriculture très évoluée qu'ont lieu des apports de matière organique.

La matière organique des sols de la zone intertropicale.

Alors que l'on connaît de nombreux types de matière organique dans la zone tempérée ayant fait l'objet de nombreuses études, il est loin d'en être de même dans la zone tropicale. Certes, on connaît des tourbes surtout oligotrophes, des anmoor dans les sols hydromorphes, des mull calciques dans les rendzines, etc. Il s'agit en fait de types définis dans les pays tempérés que l'on retrouve en zone intertropicale dans des conditions présentant certaines analogies avec celles des pays tempérés.

En fait, les types de matière organique des sols les plus fréquemment observés (sols à hydroxydes) sont qualifiés "à décomposition rapide", "fortement évolués", etc. Cette matière organique est difficile à ramener à un type défini en zone tempérée. Des études entreprises systématiquement par Ch. THOMANN, DOMMERGUES, sur les diverses matières organiques ont montré que les sols des zones arides avaient une matière organique riche en acide humique et pauvre en acide fulvique, tandis que ceux des zones très humides avaient une richesse plus grande en acide fulvique qu'humique.

Un problème souvent évoqué dans les sols tropicaux est celui de l'explication de la présence de matière organique en profondeur. Différents processus peuvent être envisagés.

- Dans les sols tourbeux, il n'y a pas de mélange des matières minérale et organique. Cette dernière est due aux végétaux aquatiques simplement accrochés au fond par les

racines et toutes les parties aériennes tombent et s'entassent peu à peu sans se décomposer ni se mélanger avec le substratum.

- Dans le cas des autres sols, il faut admettre la fourniture de la matière organique par les racines des végétaux décomposition des racines, mais surtout par le brassage biologique. Toutes sortes d'animaux de petite taille (fourmis, termites, vers), de taille moyenne (souris, rongeurs divers, etc) qui remuent des quantités considérables de terre, soit par passage dans leur tube digestif, soit en descendant dans des galeries la matière organique venue de la surface. Une pénétration purement mécanique n'est pas à exclure, tout spécialement dans le cas des sols très sableux. Un changement de perméabilité peut provoquer la précipitation en profondeur des parties les plus solubles.
- Dans le cas des vertisols, la pénétration doit se faire par les fentes ouvertes en saison sèche et fermées pendant les pluies. L'humus emprisonné se trouve brassé lors des mouvements internes qui intéressent ces sols.

11.3. L'ACCUMULATION DES HYDROXYDES.

Une caractéristique majeure des sols de la zone intertropicale est l'accumulation des hydroxydes de fer, aluminium, titane et manganèse. La couleur des horizons B du sol (rouge, brun-rouge, jaune ...) est toujours due aux produits ferrugineux, sans qu'il y ait une relation quantitative entre la couleur et la teneur en fer. Mais le fait que les produits ferrugineux sont fortement colorés, donc très visibles, ne doit pas forcément inciter à leur attribuer un rôle prépondérant. Il y a lieu de penser que la silice dont les combinaisons sont modestement colorées, a un rôle fondamental.

La libération du fer de ses combinaisons des minéraux primaires produit du fer sous forme d'ions ferreux ou ferriques qui s'hydrolysent rapidement pour donner des hydroxydes. En milieu aéré, la forme ferreuse ne subsiste pas. Les produits tels que la goethite ou l'hématite, les hydroxydes amorphes, sont des constituants très ordinaires. En milieu réducteur, le fer passe à l'état ferreux et est alors susceptible d'être solubilisé et de migrer ; il se redéposera ailleurs dès que les conditions réductrices auront disparu. En milieu alcalin, la silice est plus abondante ; elle est susceptible de se combiner avec les ions ferriques et des bases pour donner des produits argileux de type montmorillonite-montronite modestement colorés.

L'individualisation des oxydes ou hydroxydes de fer est la ferrugination. Elle n'a pas de caractère spécifique pour aucun sol puisqu'elle peut s'observer en zone intertropicale comme méditerranéenne. Elle traduit le fait que les ions ferriques libérés des minéraux primaires l'ont été dans des conditions de pH et de drainage telles que la réaction avec la silice n'a pu se produire de manière importante et que l'hydrolyse des ions a donné des oxydes et hydroxydes colorés.

La libération de l'aluminium se produit dans des conditions sensiblement les mêmes que celles du fer. A un pH légèrement plus élevé, l'hydrolyse peut aboutir à l'individualisation de la gibbsite. Mais l'affinité de l'alumine pour la silice est telle qu'il ne peut y avoir de formation de gibbsite que si le drainage est tout à fait bon. Si celui-ci est un tant soit peu ralenti, il y a réaction de la silice avec l'alumine pour constituer des minéraux argileux qui seront relativement pauvres en silice (kaolinite) en milieu acide à drainage moyen, ou riches en silice (montmorillonite) en milieu alcalin à drainage réduit.

La libération de la silice s'opère à partir de tous les minéraux primaires ou secondaires qui en contiennent. La silice est soluble dans l'eau pure (120 ppm) et peut être éliminée complètement du profil. Elle se recombine avec l'alumine, le fer ou les bases pour former des minéraux argileux. Les concentrations purement siliceuses sont peu fréquentes.

L'individualisation d'oxydes et hydroxydes a lieu dans les zones intertropicale et méditerranéenne. On peut distinguer deux cas :

- Hydroxydes et oxydes de fer avec possibilité de gibbsite accompagnés de kaolinite.
- Hydroxydes et oxydes de fer sans gibbsite avec en plus de la kaolinite, des minéraux à trois couches. Dans le premier cas, on parlera de ferrallitisation, dans le second de fersiallitisation.

11.3.1. La ferrallitisation.

Le processus de ferrallitisation (AUBERT, SEGALIN, 1966) résulte de la conjonction de deux phénomènes principaux :

- une altération très poussée des minéraux primaires et secondaires sur une épaisseur souvent considérable, s'accompagnant de l'élimination de produits en solution et des synthèses de produits nouveaux dont certains sont caractéristiques.

- le développement d'une morphologie particulière en même temps que très variée, de propriétés physico-chimiques spéciales.

L'ensemble des sols ferrallitiques est donc caractérisé par :

1. Une altération complète des minéraux primaires (péridots, pyroxènes, grenats, amphiboles, feldspaths, feldspathoïdes, micas, etc) avec possibilité de minéraux hérités tels que : ilménite, magnétite, zircon, illite ; abondance de quartz résiduel ; élimination de la majeure partie des bases alcalines et alcalino-terreuses, d'une grande partie de la silice.

2. La présence en abondance des produits de synthèse suivants :

- . silicates d'alumine 1 : 1, famille de la kaolinite, et / ou
- . hydroxydes d'alumine (gibbsite, rarement boehmite et produits amorphes)
- . hydroxydes et oxydes de fer (goethite, hématite et produits amorphes)
- . autres minéraux tels que oxyde de titane, bioxyde de manganèse, etc.

Ces produits peuvent être identifiés par les différentes techniques actuellement en usage telles que (diffraction des rayons X, analyse thermique différentielle et thermo-pondérale, etc). La présence d'alumine sous forme libre peut également être appréciée par l'analyse chimique et le calcul du rapport silice/alumine.

3. Un profil A B C comprenant :

L'horizon A où la matière organique est bien évoluée (1).

L'horizon B le plus souvent épais où les minéraux primaires autres que le quartz sont rares ou absents et où les minéraux secondaires énumérés à l'alinéa 2 sont essentiels.

L'horizon C est variable et dépend pour beaucoup de la roche-mère, quelque soit son épaisseur, quelques centimètres ou 20 mètres, l'horizon est caractérisé par des matériaux (autres que le quartz et ceux énumérés à l'alinéa 1), complètement altérés et s'écrasant sous la pression des doigts.

4. L'abondance de la pluie chaude détermine en outre l'apparition des caractéristiques physico-chimiques suivantes :

- Une capacité d'échange faible, qu'elle soit mesurée sur l'argile ou le sol total, en raison des constituants kaoliniques et des sesquioxides (actuellement une valeur limite est difficile à préciser) ;

(1) Dans certains cas peu fréquents, on peut avoir de la matière organique grossière.

- Une quantité de bases échangeables faible ;
- Un degré de saturation variable, mais généralement faible ;
- Un pH acide.

5. Si tous les sols ferrallitiques doivent répondre aux critères ci-dessus, qui définissent la ferrallitisation, un certain nombre de processus spécifiques peuvent intervenir à des degrés divers :

- accumulation de matière organique (dans certaines zones d'altitude très pluvieuses et fraîches),
- hydromorphie (qui intervient dans certaines zones planes),
- appauvrissement,
- lessivage (tel qu'il est défini au paragraphe 1.2.b¹, ce processus apparaît plutôt rare dans les sols envisagés).
- à des processus essentiellement physico-chimiques, il est proposé d'en rajouter deux autres de nature purement mécanique appelés "remaniement" et "rajeunissement".

A ces processus, on peut adjoindre, dans de nombreux cas, l'induration.

La ferrallitisation se produit actuellement dans les parties humides de la zone intertropicale. A basse altitude, la pluviométrie minimum paraît être de l'ordre de 1200 à 1400 mm de pluie. En haute altitude, un abaissement de la température jusqu'à 12° n'empêche pas la ferrallitisation, à condition que la pluviométrie reste élevée (SEGALEN, 1965). Toutes les roches peuvent donner lieu à la ferrallitisation, à condition qu'elles ne soient pas trop quartzeuses. La végétation est la forêt primaire (ombrophile ou semi-décidue); elle peut être localement remplacée par la savane. Le relief est rarement plat, le plus souvent ondulé sur les anciennes surfaces d'érosion; on peut avoir également des zones à pentes fortes dans les régions montagneuses et d'accumulation volcanique. Le temps pendant lequel s'est effectuée la ferrallitisation est toujours fort long et intéresse des périodes géologiques entières. Il se chiffre par plusieurs dizaines ou centaines de millions d'années.

Les fluctuations climatiques ont été importantes au cours des temps passés. On sait que des climats humides se sont étendus beaucoup plus loin vers le Nord qu'actuellement et, de ce fait, des sols ferrallitiques anciens s'observent à la limite du désert au Niger, au Mali, etc.

La ferrallitisation intéresse actuellement une zone importante en Afrique. Le long du rivage atlantique, elle s'étend depuis l'embouchure de la Gambie jusqu'en Angola. Vers l'intérieur, la limite est assez irrégulière, mais suit les variations de la pluviométrie. En particulier en Côte d'Ivoire et au Togo-Dahomey. Elle traverse le Nigéria et le Cameroun vers le 8 ou 10° N, englobe plus de la moitié de la République Centrafricaine, une partie de l'Ouganda et Kenya, du Tanganyika, le Nord de la Zambie et de l'Angola. Le Congo-Kinshasa est presque totalement ferrallitique. À Madagascar, tout le versant oriental et les hauts plateaux centraux sont intéressés par la ferrallitisation.

Ce processus est également prédominant dans la partie humide du Brésil, dans les Guyanes, au Vénézuéla, en Colombie, au Pérou, en Equateur, Amérique Centrale et certaines parties très humides du Mexique méridional. Ceylan, le Sud-Est asiatique, l'Indonésie, les Philippines, la Chine méridionale, l'Australie du Nord, et les innombrables îles du Pacifique sont intéressés par ce processus.

Une conséquence importante sera la perte par lixiviation de quantité de produits solubles (les bases alcalines et alcalino-terreuses, silice, etc.), une acidification marquée du sol; malgré des propriétés physiques favorables, le degré de fertilité est forcément réduit. Les réserves sont faibles et seule la vie biologique intense concentre à la partie supérieure des sols une accumulation d'éléments fertilisants en quantité généralement très limitée.

11.3.2. La fersiallitisation.

Le processus de fersiallitisation comporte :

- une altération poussée des minéraux des roches sur une épaisseur beaucoup moins forte que dans le cas de la ferrallitisation avec une élimination moindre des produits de l'hydrolyse, accompagnée de synthèses de produits nouveaux.
- une morphologie particulière.

La définition générale de la classe pourrait être la suivante :

1. Une altération aussi complète des mêmes minéraux primaires que pour les sols ferrallitiques, mais portant sur une épaisseur beaucoup moins grande, avec les mêmes possibilités de minéraux hérités et de quartz résiduel.

2. Les produits de synthèse sont caractérisés par une élimination moins poussée de la silice qui devra se retrouver plus abondante dans les produits de synthèse du sol (cristallins ou amorphes).

- silicates de la famille de la kaolinite encore abondants mais apparition de minéraux 2 : 1 en quantité souvent forte. Les sols de cette classe sont ceux pour lesquels PEDRO (1966), propose le terme "bisiallitisation".
- absence d'hydroxydes d'alumine.
- présence d'hydroxydes et oxydes de fer et produits divers (bioxyde de manganèse).

3. Profil A B C

Horizon A. Matière organique bien évoluée, présence très fréquente d'un A_2 .

B. Minéraux primaires autres que quartz rares; minéraux hérités abondants parfois, structuration souvent accusée.

C. Généralement assez réduit, peut manquer; altération beaucoup moins poussée que pour les sols ferrallitiques, arénisation fréquente.

4. La diminution de la pluie, et aussi de la température, provoque :

- une capacité d'échange moyenne.
- un degré de saturation moyen.
- un pH moyennement acide à presque neutre.

La fersiallitisation se produit actuellement dans les parties assez peu humides de la zone intertropicale (600 à 1200 mm environ) et dans la zone méditerranéenne (500 à 800 mm). La plupart des roches sont susceptibles de donner naissance aux sols fersiallitiques. La végétation est la forêt décidue, la savane et les formations méditerranéennes. Le relief est parfois très plat, ou à pente très douce ou bien encore montagneux. Il en résulte des différences dans le drainage qui déterminent des différences dans le comportement du fer. On n'a pas de données précises sur l'importance du temps.

Les sols fersiallitiques occupent une zone géographique qui enveloppe celle des sols ferrallitiques en Afrique, Sénégal, Mali, Haute-Volta, Cuvette tchadienne, etc, côte ouest de Madagascar, Moyen Orient, pays du bassin méditerranéen, Mexique, Australie, etc.

Les sols ferrugineux tropicaux sont caractérisés par une mobilité du fer qui apparaît due beaucoup plus à des causes d'ordre topographique influant de manière pré-

cise sur les possibilités de réduction au cours d'une phase hydromorphe. Ces sols par leur degré de saturation moyen à élevé, leur pH acide, l'abondance de la kaolinite, ont beaucoup de parenté avec les sols ferrallitiques.

Les sols dits méditerranéens ne présentent pas de mobilité du fer car le drainage est normalement assuré et la coloration du sol est réalisée de manière homogène par des produits ferrugineux cristallisés ou amorphes. Une partie du fer peut être incluse dans des réseaux 2 : 1 de type nontronite ou illite. Le degré de saturation est élevé, le pH faiblement acide à faiblement alcalin. Le calcium peut précipiter sous forme de carbonates. Les minéraux argileux sont de préférence 2 : 1.

11.3.3. L'induration.

Une caractéristique essentielle du paysage tropical est fournie par les cuirasses qui constituent souvent des plateaux d'étendue variable et bordés de corniches plus ou moins abruptes et ceinturés de blocs éboulés. Ces cuirasses peuvent également s'observer à la base de certains versants, occuper tout ou partie d'un glacis, ceinturer des mares, etc. Il s'agit d'un matériau de couleur rouge à rouge foncé, généralement vacuolaire qui ne peut être brisé qu'à l'aide de coups de marteau appliqués avec force.

Cette cuirasse est un des éléments des sols tropicaux les plus anciennement connus. Elle a fait l'objet de descriptions par des naturalistes dès le début du 19^e siècle. BUCHANAN (1807) est probablement le premier à l'avoir examinée et décrite sous le nom de "latérite". Il s'agissait d'un matériau vacuolaire susceptible de se tailler et de durcir irréversiblement à l'air, à la manière d'une brique. Un tel matériau est apparu difficile à trouver en place. Si il est aisé de pouvoir, en séchant une argile rouge au soleil, lui donner la consistance de la brique, il apparaît difficile de lui donner une apparence vacuolaire. Celle-ci par contre se rencontre naturellement mais en place. LACROIX (1913) qui a étudié les cuirasses en Guinée, à Madagascar, situe les formations de la cuirasse à l'intérieur même du sol, en zone intéressée par les variations d'une nappe phréatique et en relation avec une topographie horizontale. Par la suite, la cuirasse fit l'objet de très nombreux travaux à la fois sur le plan de la morphologie de la constitution, de la genèse. A l'ORSTOM, R. MAIGNIEN y a consacré de nombreux travaux. Au cours des temps, les sols contenant de la latérite ont été dénommés "latéritiques" et une certaine confusion s'est élevée sur le sens précis à accorder à

ces mots. Aussi les pédologues français ont-ils préféré renoncer à l'emploi du terme de latérite. Les sols des régions intertropicales sont ferrallitiques ou fersiallitiques. L'induration peut se produire à l'intérieur d'un profil et provoquer la formation d'un horizon renfermant le matériau défini précédemment.

La cuirasse est constituée surtout d'oxydes de fer (hématite) et d'hydroxydes de fer (goethite) et d'alumine (gibbsite ou boehmite), à côté desquels peuvent exister des minéraux argileux comme la kaolinite, des minéraux primaires comme le quartz. Des teneurs variables, généralement faibles en oxydes de titane et manganèse, peuvent également exister. L'aspect extérieur est variable :

- La couleur peut être rose, rouge, rouge foncé à noir. Les couleurs claires sont surtout celles de l'alumine, mais une estimation même sommaire de la composition est toujours aléatoire.
- La structure est très souvent vacuolaire, c'est-à-dire avec des cavités anastomosées; vésiculaire, avec de petites cavités non jointives; lamellaire, massive, pisolitique, bréchique, etc.

La cuirasse peut résulter d'une concentration résiduelle des produits alumineux et ferrugineux par suite du départ d'une grande quantité de matériaux exportables (bases, silice). Il s'agira dans ce cas d'une accumulation relative; les cuirasses bauxitiques sont de ce type. Un élément relativement mobile comme le fer peut avoir été apporté dans le profil, essentiellement par des migrations obliques de solutions. Il s'agira alors d'accumulation absolue (DHOORE, 1954).

Une fois la concentration en oxydes et hydroxydes achevée, l'induration peut se produire. Celle-ci est indépendante de la teneur en hydroxydes et paraît liée à une cristallinité des produits ferrugineux qui se distribuent suivant une trame continue. Une suite de dessiccations et d'humectations apparaissent nécessaires pour déclencher l'induration du matériau. La cuirasse apparaît très fréquemment dans un horizon affecté par l'hydromorphie (horizon tacheté) qui réalise déjà une certaine concentration de produits ferrugineux.

La cuirasse existe normalement à une certaine profondeur dans le sol (entre 0,5 et 10 m). Elle peut affleurer en surface si l'érosion a décapé le sol meuble qui se trouvait au-dessus. Très souvent, elle affleure sur le pourtour de plateaux lorsque l'érosion affouille les bords de ceux-ci. Il existe en Afrique de vastes surfaces

planes ou subhorizontales où les cuirasses sont dégagées et paraissent portées à une certaine altitude par suite de l'enfoncement du réseau hydrographique.

La mise en mouvement du fer grâce à la possibilité qu'il présente de se réduire et de se complexer, fait qu'il est susceptible de migrer, de traverser des zones à pente douce, comme les glacis, et lorsque le complexe est détruit de reprécipiter et former de nouvelles cuirasses.

Au voisinage des mares, la succession de réductions et oxydations, humidifications et dessiccations favorise la formation de cuirasses localisées. Le morcèlement des cuirasses par l'érosion est un phénomène très banal. Les fragments vont nourrir les "stone-lines". Celles-ci peuvent se ressouder et reformer des cuirasses de type bréchique ou conglomératique.

Par conséquent, ce matériau apparaît comme voie de constante destruction et de reformation. Toutes les parties de la zone intertropicale peuvent être cuirassées, les zones les plus humides comme les plus sèches. En effet, on en observe sur l'équateur comme sur la frange des déserts. Aussi, beaucoup de cuirasses sont-elles fossiles et dégagées actuellement par l'érosion. D'après les nombreuses observations qui ont pu être faites, il semble que, un climat à saisons très tranchées, successivement très humide et très sec, joint à une topographie à peu près plane, soit le plus favorable au cuirassement.

11.4. L'ACCUMULATION DU CALCAIRE.

On peut noter dans les sols, du calcaire qui peut avoir deux origines très différentes. Dans la première, il peut s'agir de calcaire résiduel, où ce produit résulte de la dissolution partielle, en cours, d'un calcaire sous-jacent. Dans les rendzines, par exemple, les fragments calcaires résultent d'une dissolution incomplète de la roche-mère.

Dans la deuxième, il s'agit de la formation "in situ" de calcaire qui résulte de la rencontre dans le sol d'ion calcium avec du gaz carbonique, ou bien de l'introduction de calcaire provenant de la précipitation de carbonate préalablement dissout sous forme de bicarbonate et transporté par les eaux. Seul ce mode de formation nous retiendra ici.

Conditions de formation du calcaire secondaire.

Elles sont climatiques, topographiques et pétrographiques.

Seuls, les climats à longue saison sèche sont favorables à la formation de calcaire dans le sol. Cette condition est réalisée en Afrique tropicale au-dessous de l'isohyète 1.000 mm. Dans la zone méditerranéenne, malgré une température nettement plus faible, elle est également réalisée. Dans certaines zones d'altitude de la zone intertropicale, à longue saison sèche, comme certaines parties du Mexique Central, il existe également des possibilités de calcification.

En ce qui concerne la topographie, les zones planes, peu favorables à l'évacuation rapide des solutions susceptibles de fournir du calcaire, paraissent à première vue présenter les meilleures situations. En fait, c'est ce qu'on observe le plus souvent en Afrique tropicale. Les zones à pente faible ou moyenne, les ruptures de pente sont également tout à fait favorables à une précipitation de calcaire. On peut voir des encroûtements intéresser des topographies ondulées, sur de grandes étendues.

Le rôle des roches-mères est évidemment loin d'être négligeable. La présence d'un sédiment calcaire favorise la dissolution de quantité appréciable de produit et sa redistribution ultérieure. Dans la zone méditerranéenne, la prédominance des calcaires sur toutes les autres roches est un facteur essentiel de l'abondance des croûtes calcaires. Les basaltes, qui peuvent renfermer jusqu'à 15 % de chaux, sont également des roches favorables à la calcification; c'est le cas pour le sud de Madagascar ou le Mexique Central. Les autres roches pauvres en ions calcium, sont défavorisées à cet égard. Un grès, un sable, un granite alcalin, ne renferment pas ou très peu d'ions calcium susceptibles de produire du calcaire. Aussi, même si les conditions climatiques ou topographiques s'y prêtent, les concentrations de calcaire seront discrètes ou très faibles. Un granite calco-alcalin, avec quelques amphiboles, sera susceptible (et c'est le cas au Nord-Cameroun) de présenter une calcification secondaire notable. Les alluvions sont un milieu hétérogène où coexistent des quantités de minéraux différents dont certains permettent de libérer du calcium. Il va de soi que les solutions circulant dans le sol sont susceptibles en s'évaporant de fournir du calcaire aux sols.

Dans tous les cas, les bicarbonates se transforment en carbonates par perte de gaz carbonique. L'ion calcium est fourni par les minéraux qui en contiennent, tels que les plagioclases calciques, certains grenats, certains amphiboles et pyroxènes, etc.

Le gaz carbonique est fourni par l'air ou bien par la décomposition des substances organiques.

Formes revêtues par l'accumulation calcaire dans les sols.

C'est en zone méditerranéenne que la calcification secondaire est la plus évidente, c'est là aussi qu'elle revêt les formes les plus variées. Ce sera donc aux pédologues ayant longuement travaillé dans cette zone que seront empruntées les définitions qui suivent (BOULAINÉ, DURAND, RUELLAN, WILBERT, etc.).

Les accumulations diffuses. Le calcaire est sous une forme très fine, parfois peu visible. Il peut prendre la forme de pseudo-mycelium dans les espaces vides du sol, dans les cavités d'anciennes racines.

Les amas friables sont des collections individualisées, tendres, de forme et dimensions variables. Ils ont été dénommés "nodules farineux", "sphères", "chandelles". Leur délimitation est parfois malaisée.

Les nodules sont des collections calcaires à bords nets généralement très durs, de formes assez proches de la sphère, de 2 à 5 cm de diamètre. Leur couleur est claire, tandis que l'horizon dans lequel ils se trouvent peut être sombre. Ce sont les nodules concrétionnés de DURAND.

Les formations suivantes constituent ce qu'on appelle des carapaces calcaires. Elles peuvent être simples ou comprendre plusieurs éléments.

L'encroûtement est le terme qui s'applique lorsque l'invasion du calcaire est continue, et telle qu'elle fait disparaître les caractéristiques propres de l'horizon dans lequel elle est observée. Cet encroûtement peut être homogène (encroûtement tuffeux, formation pulvérulente de DURAND, tofezza homogène de BOULAINÉ), ou englober des nodules comme dans l'encroûtement nodulaire de WILBERT. Il est généralement de couleur claire et d'épaisseur très variable (quelques centimètres à plusieurs mètres).

La croûte est une formation généralement durcie, présentant une structure lamellaire, feuilletée, épaisse de quelques centimètres à plus d'un mètre, très riche en calcaire. C'est la "croûte zonaire" de BOULAINÉ, DURAND. La teneur en calcaire est très élevée (jusqu'à 70-90 % de CO_3Ca). Le sommet de la croûte est généralement très net, tandis que, vers le bas, on passe graduellement à un encroûtement.

La dalle compacte est une formation très dure de couleur grise ou crème. Il peut y avoir plusieurs feuillets massifs de 10 à 20 cm d'épaisseur. Pas de structure zonaire.

La pellicule rubanée est une formation mince très dure, très calcaire, constituée de la superposition de lamelles très fines, au sommet d'une croûte ou d'une dalle.

Répartition géographique et pédologique des accumulations calcaires.

D'une manière générale, la zone méditerranéenne est la zone d'élection des accumulations calcaires, favorisées par le climat et les roches-mères contenant du calcaire ou du calcium en abondance (Afrique du Nord, sud de l'Espagne, Chypre, Moyen-Orient, Mexique, etc.). Toutes les formes d'accumulation discontinues ou continues sont représentées. L'Afrique tropicale, où le calcaire est rare, ne présente que des accumulations discontinues et généralement assez discrètes (accumulations diffuses ou nodules).

Dans un certain nombre de sols, ces accumulations constituent une caractéristique assez importante.

- Classe des sols peu évolués. Dans les sols peu évolués dérivés d'alluvions, les accumulations diffuses, les amas friables généralement de petite taille sont visibles dans la cuvette tchadienne et bien d'autres endroits.
- Classe des Vertisols. Dans les sols de cette classe, les nodules de 1 à 3 cm, très durs, sont observables à la base de l'horizon B. Ils occupent une portion souvent régulière de cet horizon. Si le vertisol dérive d'un basalte, on peut observer au contact de la roche en voie d'altération un véritable encroûtement friable.
- Classe des sols isohumiques. C'est aux sols de cette classe que les plus belles accumulations calcaires sont associées depuis l'accumulation diffuse jusqu'aux encroûtements de plusieurs mètres. La limite entre le sommet de l'encroûtement et l'horizon qui se trouve au-dessus est généralement très nette et renforcée par la différence de couleur de l'horizon supérieur et l'horizon calcaire.
- Classe des sols hydromorphes. De nombreux sols hydromorphes présentent des accumulations de calcaire sous forme de nodules ou même d'encroûtements surtout dans les régions méditerranéennes.
- Classe des sols halomorphes. Des accumulations de calcaire sous forme de pseudomycélium ou d'amas friables sont notés dans des sols à alcalis à structure modifiée

(solonetz solodisés de la cuvette tchadienne). Ce calcaire doit pouvoir être mis en relation avec le remplacement du calcium du complexe par le sodium.

Les hypothèses formulées pour expliquer la présence d'épaisses masses calcaires sont parfois assez divergentes. Pour les uns, il ne saurait s'agir d'une pédogenèse véritable, mais seule la partie supérieure du profil serait d'origine pédologique, tandis que la partie calcaire serait un véritable niveau géologique. Pour d'autres, il s'agirait d'un enrichissement de la partie profonde du profil par lessivage vertical de la partie supérieure. Pour d'autres enfin, le calcaire est trop abondant pour s'être formé en place; il est venu d'ailleurs en solution, et a précipité après un voyage parfois fort long.

La place des accumulations calcaires dans le profil.

La place accordée au calcaire est fonction du rôle qu'on lui attribue dans la formation du profil.

Si on pense que la formation de l'accumulation calcaire est distincte de celle du sol qui la surmonte, cette accumulation sera considérée comme une véritable roche-mère et on parlera "de sol sur croûte calcaire". Mais, il existe bien des cas où ce calcaire fait partie intégrante du profil.

Lorsque la calcification est modérée et discontinue, il est convenu de placer en même temps que la désignation habituelle de l'horizon les lettres "Ca". On aura ainsi un horizon C Ca ou B₂Ca.

La nécessité d'un véritable horizon calcaire s'est fait sentir et l'horizon K a été récemment proposé par GILE et al. (1966) qui se caractérise par une accumulation secondaire de calcaire supérieure à 60 %. L'horizon se subdivise en trois parties K₁, K₂ et K₃, qui sont calquées sur celles de l'horizon B.

11.5. LES MIGRATIONS DE SUBSTANCES NON SOLUBLES ET SOLUBLES.

11.5.1. Migration de substances non solubles.

Deux processus sont habituellement décrits : lessivage et podzolisation. Ils sont peu courants en zone intertropicale. On leur adjoint le processus d'"appauvrissement".

Le lessivage est un "processus d'entraînement mécanique des colloïdes en milieu faiblement humifère, moyennement ou peu acide et biologiquement actif". (Ph. DUCHAUFOR, 1965).

Le processus doit se traduire par le développement dans le profil d'un horizon d'accumulation des colloïdes qui ont quitté la partie supérieure du profil. Cette accumulation se traduit par la présence d'enrobements (1) à la surface des agrégats et la constitution d'un horizon "argilique" (USDA - 7° Approx.). L'examen de la courbe de la teneur en argile en fonction de la profondeur montre très nettement un "ventre" d'accumulation. Le fer libéré des minéraux primaires doit, si le pH est supérieur à 3,2, précipiter pour donner des oxydes, hydroxydes insolubles, amorphes ou cristallisés. Pour qu'il y ait migration du fer, deux conditions doivent être remplies (elles le sont souvent ensemble dans la nature); réduction du fer ferrique en ferreux, ce qui remonte le pH de précipitation de l'hydroxyde à 6,0, et offre à l'ion ferreux la possibilité de migrer; complexation de l'ion ferreux ou ferrique par des produits d'origine minérale ou organique. Le fer ferreux ou ferrique est alors inclus dans une grosse molécule soluble, ce qui explique leur possibilité de migration. Enfin, ils peuvent exister dans le complexe argilo-humique (chélaté dans la partie humus ou bien pont entre l'argile et l'humus). Le fer migre alors en bloc avec les colloïdes.

Les conditions de migration de l'argile, suivie de son accumulation en profondeur pour constituer un horizon argilique tel qu'il est défini plus haut ne paraissent pas fréquemment remplies en zone intertropicale. On observe, par contre, plus souvent l'appauvrissement.

La podzolisation est un processus d'altération chimique intense des éléments silicatés sous l'influence d'un humus grossier très acide à décomposition lente. Il se développe sous un horizon A_r, un horizon A₁ assez modeste, un horizon A₂ parfois très épais. Les horizons B renferment de la matière organique, du fer et un peu d'alumine.

Malgré une littérature abondante, sur le processus de podzolisation, il semble que bien des points soient obscurs. Les travaux les plus récents (DUCHAUFOR 1967, IARKOV, 1956 ..) feraient penser que les points suivants sont particulièrement importants:

Les acides organiques, les produits phénoliques solubles originaires des litières ont un rôle capital dans les processus d'altération et de complexation.

(1) "Clay-skins", "coatings", dans la littérature anglo-saxonne.

Ces produits prennent naissance au niveau des horizons organiques biologiquement peu actifs comme les "mor".

Une phase d'anaérobiose provoquant le passage du fer de la forme ferrique à la forme ferreuse favorise la complexation et la migration du fer lors du mauvais drainage qui accompagne la fonte des neiges dans les pays boréaux.

Les silicates jouent un rôle de frein à l'égard de la podzolisation; les hydroxydes ont tendance à immobiliser les substances susceptibles d'assurer leur migration. Par contre, les roches très acides, quartzieuses sont favorables à la podzolisation. L'accumulation de l'humus et du fer est encore assez mal connu.

Dans la zone intertropicale, des profils de sols podzoliques, tels qu'esquissés ci-dessus, sont plutôt rares. L'horizon d'humus grossier est bien peu souvent observé. La formation d'un horizon A_2 suivi d'un B d'accumulation ferro-humique a lieu dans certaines zones sableuses côtières de Côte d'Ivoire, de Madagascar, etc. Un milieu très perméable facilite le balayage, par des solutions complexantes, de l'horizon A_2 beaucoup plus épais que dans la zone tempérée. La précipitation n'intervient que s'il existe une zone d'arrêt tel e que nappe phréatique ou niveau de granulométrie beaucoup plus argileuse. On peut observer alors un véritable alios humo-ferrugineux.

Dans la zone des sols ferrallitiques, il arrive que l'on observe, dans les zones les plus arrosées du Gabon ou du Congo, un discret début de podzolisation, mais ces sols n'occupent que bien rarement des surfaces cartographiables.

Si le lessivage et la podzolisation, processus des pays tempérés et froids, sont peu fréquents en zones intertropicale et méditerranéenne, le processus d'appauvrissement est par contre très banal et répandu. Il consiste en une perte, souvent importante, d'argile et de fer dans la partie supérieure des profils, qui n'est pas compensée par une augmentation notable dans la partie inférieure. Malgré des teneurs en argile très différentes (par exemple 7-10 % en A - 40-50 % en B), il n'y a pas d'horizon argilique qu'on puisse mettre en évidence par une augmentation caractéristique et limitée de la teneur en argile avec la profondeur. Il n'y a pas non plus d'enrobements. La perte d'argile (et de fer) n'a pu s'effectuer que par suite de migration oblique ou bien, dans certains cas de décomposition de silicates d'alumine, à la partie supérieure des profils.

Cet appauvrissement a lieu sur des topographies très variables. Elle peut se produire sur des pentes moyennes à fortes, sous couverture forestière dense en zone équatoriale. Il est possible que le sol, très mouillé, ne puisse plus évacuer vers les nappes un excès d'eau arrivé subitement. Cette eau circule dans le sol à faible profondeur et s'évacue obliquement, en entraînant des quantités minimales d'argile, laissant sur place les fractions grossières. C'est cet appauvrissement qui est responsable de la charge essentiellement argileuse des rivières en zone équatoriale.

En zone tropicale, les sols peuvent être moins épais, avec une roche encore peu altérée en faible profondeur; ou bien, des remaniements ont modifié la partie supérieure des profils en déterminant des zones de discontinuité qui gênent un écoulement vertical régulier des eaux. La topographie est le plus souvent assez plane avec des pentes très douces vers des talwegs faiblement enfoncés. Les averses brutales et abondantes tombant au cours d'une saison des pluies relativement courte ont du mal à s'évacuer verticalement (nappe phréatique trop haute, sol assez peu profond), une bonne partie de l'eau doit s'écouler obliquement en enlevant des proportions notables d'argile qui sont entraînées vers les cours d'eau voisins.

11.5.2. Migration des substances solubles.

Il peut y avoir migration de très nombreuses substances solubles dans un sol des régions méditerranéenne et intertropicale. Plusieurs substances donnent parfois naissance à une accumulation ultérieure telle que les bases et la silice.

Dans les zones où les précipitations sont élevées, les ions basiques (alcalins ou alcalino-terreux) libérés à partir des minéraux primaires sont éliminés par les solutions du sol. Les seules zones où il peut y avoir une certaine accumulation d'ions basiques est, sans doute paradoxalement, l'horizon humifère; sous l'action de la migration biologique due à l'action de la végétation qui provoque une augmentation provisoire dans l'horizon humifère des teneurs en bases, sous l'action des organismes vivants, termites, fourmis, etc, qui réussissent à effectuer des concentrations locales, comme de calcium par exemple. Dans toutes ces zones bien arrosées, on peut parler de "lixiviation" qui signifie mise en solution suivie d'exportation hors du profil de produits très solubles.

Dans les zones tropicales sèches ou méditerranéennes, le calcium peut arriver à se carbonater et s'immobiliser dans le profil. Dans les conditions très sèches,

les autres bases comme le sodium peuvent arriver à se carbonater et se traduire par des accumulations de natron. Le magnésium et le potassium donnent rarement naissance à des sels solubles dans les sols. Ceci est le cas lorsque les bases proviennent de l'altération de roches cristallines d'origine ignée ou métamorphique où l'anion est surtout fourni par la silice. Lorsqu'il s'agit de roches sédimentaires, ou bien lorsque les sols ont été imprégnés par les eaux salées (parfois très faiblement), on peut aboutir à des accumulations de chlorure ou sulfate de sodium de sulfate de calcium. De plus certaines bases peuvent contribuer à la constitution de différents minéraux argileux : magnésium (et calcium) contribuent à la formation de la montmorillonite; le potassium à celle de l'illite.

La silice, en milieu très arrosé, est libérée et présente dans les solutions du sol sous forme de silice monomère; elle peut alors être évacuée totalement si le drainage est suffisamment bon. Si le sol est toujours mouillé, si la nappe phréatique est haute, la réaction de cette silice avec l'alumine est très rapide pour former de la kaolinite qui devient le minéral argileux prépondérant de la plupart des sols de la zone intertropicale. Si la pluviométrie est moins forte ou le drainage moins efficace, les possibilités de combinaisons de la silice avec l'alumine, le fer, le magnésium, le potassium augmentent, et les minéraux argileux sont prépondérants (minéraux à trois couches, comme l'illite et la nontronite). Il arrive que des accumulations de silice sous forme cristalline (quartz) ou amorphe (opale) soient présentes dans les sols. Dans certaines régions sèches d'Afrique du Sud ou d'Australie, on connaît des amas siliceux connus sous le nom de "billy" ou "silicete".

L'aluminium est un métal difficilement déplaçable aux pH usuels du sol puisque les hydroxydes précipitent entre pH 4,2 et 9,5. Pour avoir de l'aluminium échangeable, il faut avoir des pH très acides. On a pu cependant montrer dans certains sols tropicaux des accumulations de produits alumineux qui n'ont pu se produire sans un minimum de mobilité de ce métal (concrétions, masses radiciformes, nodules, etc). Les premiers à avoir montré une véritable possibilité de migration de l'alumine sont GASTUCHE et HERBILLON (1962). En étudiant la précipitation de l'alumine en milieu désionisé tel qu'il doit se réaliser en milieu tropical, ils ont pu préciser que l'hydroxyde passe dès sa précipitation par un stade très dépolymérisé équivalent à une véritable dissolution avant l'apparition de la forme cristallisée, la gibbsite. C'est probablement pendant ce temps de dépolymérisation que peut se produire la migration de l'alumine avant son immobilisation définitive.

Le fer, dans les sols ferrallitiques, ne montre pas une tendance particulière à migrer. Les sols en surface restent colorés en rouge ou jaune de manière régulière indiquant un drainage convenable. Sur de grandes superficies, on observe par contre des zones tachetées en rouge alternant avec des parties blanches ou grises qui sont la marque de l'hydromorphie. Des zones de mauvais drainage, généralement sur des plateaux ou des dépressions, s'accompagnent de la formation de produits réducteurs susceptibles de réduire et complexer le fer qui a alors toute possibilité de migrer.

Dans les sols fersiallitiques, la faiblesse des pentes, en zone tropicale, rend difficile l'évacuation des eaux et favorise, lors de la saison des pluies, une hydromorphie qui est responsable d'une réduction et d'une mise en mouvement du fer. Après un trajet de longueur variable, les complexes du fer sont détruits et le métal reprécipite sous forme d'oxyde et d'hydroxyde en formant des cuirasses souvent importantes.

Les "sols rouges tropicaux" occupent des positions toujours bien drainées et le fer, n'ayant aucun motif de se mettre en mouvement, reste sous forme d'hydroxyde ou oxyde, ou bien inclus dans les réseaux des minéraux argileux.

Dans les vertisols, qui occupent des positions où le drainage est mauvais, associé à des teneurs en silice et bases élevées, le fer est inclus dans des minéraux argileux comme la nontronite et de ce fait ne migre pas.

Dans la zone méditerranéenne, les sols sur calcaire sont suffisamment perméables pour qu'aucune cause de réduction n'intervienne. Aussi, aucune migration par complexation du fer n'est apparente. Par contre, il doit pouvoir migrer en même temps que l'argile.

11.6. L'HYDROMORPHIE.

L'hydromorphie intéresse des sols dans lesquels se produit un engorgement temporaire ou permanent de l'eau. La présence de cette eau pendant une période variable de l'année se traduit par l'apparition de plusieurs processus d'ailleurs étroitement associés, dont la conjonction donne les sols hydromorphes.

Le premier processus est l'accumulation de la matière organique, qui a été envisagée au paragraphe 2. Dans les conditions de l'hydromorphie en milieu tropical,

l'accumulation peut aboutir à des horizons tourbeux, ou à des anmoor.

Le pseudo-gley (g) résulte de conditions alternativement réductrices et oxydantes. Les premières se traduisent par la formation de substances réductrices produites par l'action de microorganismes sur la matière organique. Elles provoquent la genèse de produits ferrugineux et manganeux et des déplacements modérés. Le retour des conditions oxydantes se traduit par la réoxydation des produits réduits et leur précipitation. Il en résulte un assemblage de taches grises ou blanches associées à d'autres de couleur rouille ou ocre; le contraste entre les deux sortes de taches est très net. Lorsque les transitions sont graduelles et les contrastes peu marqués, on parlera de marmorisation.

La présence de pseudogley est donc liée à un drainage médiocre pendant une partie de l'année. Il peut exister au sommet, par suite d'un niveau imperméable, d'un profil. On parlera alors d'une nappe perchée. Il peut résulter également du battement d'une nappe qui envahit périodiquement un profil; celui-ci peut intéresser une petite partie ou bien une épaisseur considérable du profil.

Dans un certain nombre de sols de la zone intertropicale, autres que les sols hydromorphes, le pseudogley est une caractéristique remarquable. Dans les sols ferrugineux tropicaux, il y a de nombreuses marques d'hydromorphie qui vont de la marmorisation jusqu'au pseudogley typique. Dans les sols ferrallitiques, sur les vieilles surfaces d'aplanissement où la nappe phréatique est peu profonde, l'horizon tacheté est très fréquent. Ce n'est autre chose qu'un horizon de pseudogley.

Dans les sols hydromorphes, le pseudo-gley se développe dans les grandes plaines d'inondation soumises temporairement à l'inondation et où les battements de nappe sont importants et durent plusieurs mois par an, permettant une succession d'oxydation et de réduction tandis que la partie inférieure du profil est caractérisée par un gley profond lié à une nappe permanente. A Bucarest, en 1964, les pédologues roumains ont proposé pour ce type de sol le nom d'amphigley.

Le gley (G) correspond à un horizon où les processus de réduction l'emportent nettement sur ceux d'oxydation. Le fer passe à l'état ferreux qui donne au sol une teinte grise à tendance bleutée ou verdâtre. Le fer peut être à peu près totalement éliminé de l'horizon qui prend alors une teinte grise ou blanche. La réoxydation du fer donne naissance à de petites taches de couleur rouille sur fond gris.

L'horizon de gley s'observe dans les sols où l'engorgement est permanent ou quasi-permanent. Il y a rarement d'horizon de gley dans d'autres sols que les sols hydromorphes. On les observe dans les parties les moins bien drainées des plaines inondées.

Le terme de stagno-gley s'applique à des sols où l'hydromorphie est quasi-permanente et concerne l'imbibition de la partie supérieure du sol à la suite de précipitations abondantes. La matière organique est concentrée en surface sur une petite surface et les processus de réduction du fer sont dominants.

Tous les pays des zones intertropicale ou méditerranéenne peuvent avoir des sols hydromorphes. Ceux-ci occupant des zones basses, dans les plaines d'origine alluviale, peuvent représenter des superficies immenses souvent d'un seul tenant dont la récupération et la mise en valeur sont poursuivies depuis de longues années : cuvette tchadienne, marais de l'Agneby en Côte d'Ivoire, Cuvette du lac Alaotra à Madagascar, etc.

11.7. HALOMORPHIE.

L'halomorphie résulte de l'action de sels et plus particulièrement de l'ion sodium. Les sels peuvent être simplement juxtaposés aux autres produits du sol ; on parlera alors de salinisation, qui s'accompagne d'une fixation faible de cations alcalins sur le complexe absorbant.

Les principaux sels sont les suivants : (autres que le chlorure)

Natron	$\text{CO}_3\text{Na}_2, 10 \text{ H}_2\text{O}$
Trona	$\text{CO}_3\text{Na}_2, \text{CO}_3\text{NaH}, 2 \text{ H}_2\text{O}$
Thénardite	SO_4Na_2
Glaubérite	$\text{SO}_4\text{Na}_2, \text{SO}_4\text{Ca}$
Epsomite	$\text{SO}_4\text{Mg}, 7 \text{ H}_2\text{O}$

Lorsque cette fixation est notable, on parlera alors d'alcalination qui provoque des changements notables de structure. On a alors des sols à alcalis ; si la structure devient colonnaire, on parlera de solonetz ; si ce sol présente une véritable dégradation à la partie supérieure du profil, on parlera de solod.

L'accumulation des sels.

Les sels du sol peuvent être divisés en trois groupes : peu solubles (carbonates de calcium et magnésium), moyennement solubles (sulfate de calcium), très solubles (carbonates de sodium, sulfate de sodium, sulfate de magnésium, chlorure de sodium, chlorure de calcium, chlorure de magnésium). Il a été traité très longuement de l'accumulation du carbonate de calcium dans le paragraphe 4. Les deux dernières catégories sont retenues ici.

L'origine des sels dans le sol peut provenir de causes très variées :

- a) Les sels peuvent préexister dans la roche-mère sédimentaire dont dérive le sol (par exemple : sédiment à chlorure de sodium, ou gypse, du trias, de l'oligocène). Ils peuvent résulter de l'imprégnation de zones alluviales par l'eau de mer.
- b) Les sels peuvent être apportés par le vent, sous forme d'embruns et distribués à plusieurs kilomètres du rivage sur des sols primitivement non salés. Ils peuvent avoir été enlevés, lors du passage du vent sur des zones désertiques à fortes accumulations de sels.
- c) Les sels peuvent être apportés au sol par concentration en surface, par remontée capillaire, de nappes phréatiques contenant des sels dissous.
- d) Enfin, les eaux d'irrigation en zones aride ou subaride, s'évaporant dans le sol peuvent charger le sol en sels, même si la charge saline est faible au départ.

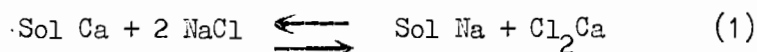
Les sols où se produisent ces concentrations sont dénommés solontchaks par les auteurs russes. Ce terme est très souvent employé dans la littérature à côté d'expressions comme "sols salés" ou "sols salins". C'est dans la partie supérieure du profil qu'a lieu la concentration des sels, à quelques centimètres de la surface. Elle détermine une structure poudreuse caractéristique. Si la concentration a lieu à la surface même du sol, elle se traduit par la formation d'une croûte saline (chlorures, carbonates ou sulfates).

La présence de sels n'a qu'une influence limitée sur le complexe absorbant. L'argile reste flocculée, la teneur en ion sodium du complexe reste modeste (moins de 15 %) et le pH ne dépasse guère 8,5. La conductivité de l'extrait saturé est supérieure à 4 mhos/cm à 25°.

L'influence du sodium est généralement considérée comme prépondérante. Lorsque la quantité de cet ion sur le complexe argilo-humique devient importante, des

modifications interviennent dans les propriétés physiques et chimiques ainsi que dans la morphologie. Ces transformations sont appelées alcalisation et les sols deviennent des sols à alcalis. Si le pourcentage du sodium sur le complexe dépasse 15 %, avec une conductivité de l'extrait saturé inférieure à 4 mhos/cm à 25° et le pH supérieur à 8,5, on parlera de sols à alcalis non salés. Si la conductivité est supérieure à 4 mhos/cm à 25°, on parlera de sols à alcalis salés.

Il est important d'examiner comment le sodium est fixé sur le complexe absorbant. L'expérience montre que le calcium est beaucoup mieux retenu par le sol que le sodium. Par conséquent, pour que la réaction :



ait lieu, il faut qu'il y ait beaucoup plus d'ions sodium présents que de calcium.

En fait, le sol à alcali ne pourra pas se former s'il n'y a en présence que des sels de sodium dont les anions sont susceptibles de constituer avec le calcium des sels solubles. La présence de carbonates ou bicarbonates de sodium est nécessaire. Ces sels fortement ionisés déterminent une augmentation très forte du pH (jusqu'à 9 ou 10).

Formation de carbonate de sodium dans les sols.

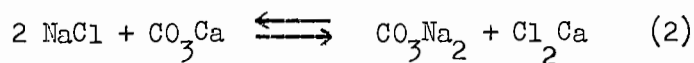
Divers modes ont été envisagés dont on retiendra les suivants :

- Altération des minéraux sodiques des roches en régions arides ou semi-arides.

Les plagioclases, certains amphiboles ou pyroxènes sont susceptibles de fournir du sodium au cours de l'altération. Celle-ci n'est pas susceptible de fournir d'autres anions que l'anion carbonique (la silice qui n'est pas éliminée par les solutions du sol participe à l'édification de minéraux argileux à trois couches), provenant soit directement de l'atmosphère, soit de la minéralisation de la matière organique.

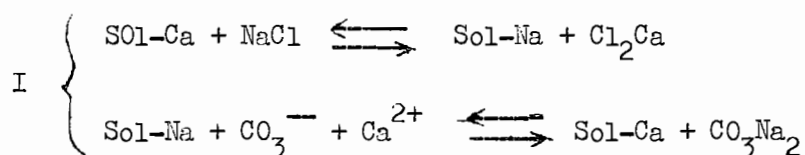
Dans certaines parties de la cuvette tchadienne, des inselbergs, des massifs résiduels granitiques sont ceinturés de sols à alcalis. Les solutions provenant de l'altération des plagioclases sont enrichies en sodium par suite de la platitude des reliefs, et se carbonatent en donnant au sol des pH élevés. Les accumulations modestes de calcaire qui sont présentes peuvent être attribuées à la réaction (2). Un excès d'ion calcium peut sans doute déplacer le sodium, ce qui fait que les bases échangeables comprennent surtout du calcium et guère plus de 10 % de sodium malgré des pH souvent proches de 10.

- Action de sels neutres sur le carbonate de calcium. Elle est basée sur la réaction :

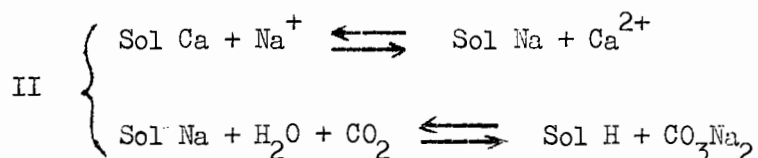


Cette réaction, en raison de la très faible solubilité du carbonate de calcium a peu de chance de se produire de gauche à droite, mais plutôt dans l'autre sens.

- Formation par échange de base (MONDESIR, 1888). Si on lessive un sol calcique par une solution saline, le sodium déplace le calcium ; si on lessive ensuite par de l'eau distillée, le calcium provenant du carbonate de calcium présent déplace le sodium, tandis que l'ion carbonique se combine au sodium pour faire du carbonate de sodium.

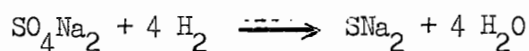


S'il n'y a pas de carbonate de calcium (GEDROIZ, 1912 ; CUMMINGS et KELLY 1923), le lessivage du sol sodique par de l'eau en présence de gaz carbonique donne du carbonate de sodium (en présence d'eau dépourvue de gaz carbonique, on obtient de la soude).



Ce schéma peut être invoqué dans la formation de sols à alcali dans les régions intérieures africaines. Il peut convenir dans tous les cas où l'eau de pluie, non chargée de sels, lessive un sol sodique. Le carbonate de sodium ainsi formé peut servir à fixer du sodium sur un sol voisin.

- Réduction de sulfates par voie microbienne. Le sulfate de sodium peut être transformé en sulfure par des réducteurs, produits au cours des transformations subies par la matière organique, ou par des microorganismes.



- La minéralisation de la matière organique, lorsque celle-ci est riche en sodium, est également susceptible de fournir du sodium.

En même temps que les modifications chimiques, évoquées ci-dessus, se produisent des modifications morphologiques importantes. L'augmentation du sodium sur le complexe absorbant va se traduire par des modifications considérables de la perméabilité par une forte diminution des particules. Cette situation favorise la migration de l'argile facilement entraînée par une percolation verticale ou un déplacement oblique. Dans les régions à alternance saisonnière marquée, des structures très prononcées peuvent apparaître avec formations de colonnes, etc. C'est dans ces horizons fortement structurés qu'apparaissent les teneurs en argile et les teneurs en sodium les plus élevées.

En même temps que se développent ces horizons profonds caractéristiques, en surface on peut observer des migrations d'argile parfois importantes se traduisant par l'apparition d'un horizon A_2 . La forte dispersion d'une argile sodique, la faible perméabilité des sols à alcali, rendent peu probable l'entraînement vertical de l'argile. Mais les caractéristiques des argiles plaident plutôt en faveur d'un entraînement oblique et l'enlèvement de particules très fines des horizons supérieurs et leur entraînement hors des profils. Les solonetz sont des sols présentant un horizon A_2 surmontant un horizon B où les teneurs en sodium échangeable sont relativement élevées et où se développe une structure en colonnes.

Dans la partie supérieure du sol, une destruction des colloïdes peut également se produire, entraînant un véritable blanchiment de l'horizon A_2 , qui n'est pas sans rappeler celui des podzols. Pour les auteurs russes, il y aurait un résidu de silice amorphe. Des microorganismes sont également capables d'assimiler de la silice et la laisser derrière eux par exemple sous forme de frustules de diatomées. De tels sols sont appelés solod. Des solonetz ayant subi une solodisation ont été décrits au Tchad (BOCQUER, 1964).

L'halomorphie est donc un processus varié quant à ses manifestations. Il s'agit au départ d'une accumulation de sels neutres qui, tant que le calcium est en quantité importante, ne modifie pas de manière considérable le complexe absorbant. La présence de carbonate de sodium élève le pH et favorise la fixation de sodium sur le complexe. Cette situation nouvelle s'accompagne de propriétés physiques et chimiques

telles qu'une morphologie des sols particulière apparaît.

11.8. AUTRE PROCESSUS. LE REMANIEMENT DES SOLS.

De très nombreux sols de la zone intertropicale présentent à la partie supérieure de leurs profils des lits de cailloux (1) qui épousent assez régulièrement la topographie. Au-dessous de cette ligne, le sol apparaît en place. En effet, les lits de minéraux ne semblent guère avoir été déplacés et les produits altérés qui les ont remplacés n'ont guère bougé. Par contre, au-dessus de la ligne de cailloux, le sol a été remanié avec une fraction fine dominante et une légère usure des sables et des cailloux qui sont subarrondis ou subanguleux.

L'origine de ce remaniement est à l'heure actuelle assez controversée. Les uns y voient le résultat d'une descente des cailloux à travers le sol. D'autres des alluvionnements successifs en relation avec des climats subarides et humides. Pour d'autres enfin, l'activité biologique est prépondérante. L'érosion apparaît comme devant avoir un rôle essentiel, alors que les versants reculent parallèlement à eux-mêmes, entraînant le remaniement de toute la tranche de sol intéressée.

(1) - Stone-line, nappe de gravats, ligne de pierres.

C h a p i t r e 12

LA CLASSIFICATION DES SOLS

INTRODUCTION

12.1. LES UNITES DE LA CLASSIFICATION.

12.2. LA CLASSIFICATION FRANCAISE.

- 12.2.1. Classe des sols minéraux bruts.
- 12.2.2. Classe des sols peu évolués.
- 12.2.3. Classe des sols calcomagnésimorphes.
- 12.2.4. Classe des vertisols
- 12.2.5. Classe des sols isohumiques.
- 12.2.6. Classe des sols à mull.
- 12.2.7. Classe des podzols et sols podzoliques.
- 12.2.8. Classe des sols fersiallitiques.
- 12.2.9. Classe des sols ferrallitiques.
- 12.2.10. Classe des sols halomorphes.
- 12.2.11. Classe des sols hydromorphes.

12.3. AUTRES CLASSIFICATIONS DE SOLS TROPICAUX.

12.4. CLASSIFICATIONS AMERICAINE ET RUSSE.

12.5. CONCLUSIONS.

INTRODUCTION.

La classification des sols est un des problèmes les plus ardues de la pédologie pour diverses raisons :

1. La pédologie est une science relativement jeune et tous les sols ne sont pas encore connus et ceux qui le sont n'ont parfois pas été complètement étudiés,
2. Les objets à classifier ne sont comparables à aucun autre. Ils n'ont pas de limite très précise et le passage d'un sol à un autre s'effectue souvent de manière graduelle, d'où l'importance que prennent maintenant dans les classifications les "intergrades".
3. Les progrès de la pédologie font que, périodiquement, la classification doit être révisée et parfois même modifiée de façon importante, quel que soit le système adopté pour la classification.
4. La classification des sols doit tendre à être universelle. Elle doit être construite de telle sorte que n'importe quel sol connu (ou non à l'heure actuelle) puisse y trouver sa place.

Il a été imaginé, dans différents pays, des systèmes très variés de classification. Pour les uns, on tiendra compte essentiellement des conditions climatiques puisqu'il a été constaté depuis les débuts de la pédologie que les sols variaient de manière très précise en fonction du climat. D'autres classificateurs se sont efforcés de tenir compte avant tout des propriétés chimiques (complexe absorbant, rapport silice/alumine; etc). Les classifications modernes se veulent essentiellement "génétiques", c'est-à-dire qu'elles s'appuient d'abord et avant tout sur les caractéristiques propres du sol qui doivent traduire un grand processus évolutif qui résulte lui-même de facteurs de formation du sol. Par conséquent, les sols devront être classés sur un ensemble de caractères propres plutôt que sur des facteurs extérieurs à ceux-ci.

Dans la classification des sols, on tiendra compte du développement du profil, du mode d'altération des minéraux en liaison avec le type de climat, du type de matière organique, de l'hydromorphie, de l'halomorphie, etc.

Dans les pages qui suivent, on présentera successivement les grandes unités de la classification des sols, la classification française utilisée dans les pays francophones d'Afrique et à Madagascar sera présentée en détail. On procédera également à

un exposé plus bref sur les classifications utilisées par d'autres pédologues travaillant en Afrique (britannique, belge, portugaise) ainsi que celle des Américains et des Russes.

12.1 HIERARCHIE DES CRITERES; DEFINITION DES UNITES DE LA CLASSIFICATION.

Il n'est pas possible d'établir une classification de structure pyramidale à partir d'un petit nombre de critères de base. A l'heure actuelle, les principales classifications tendent à reconnaître une dizaine de grandes unités fondamentales où les sols résultent de l'action d'un grand processus de formation du sol et ont suffisamment de caractères communs pour avoir un véritable "air de famille". Ce sont les "classes" (ou ordres) et les "sous-classes" (ou sous-ordres).

Les classes correspondent à un développement particulier du profil (sols minéraux bruts ou sols peu évolués profil A C ...) ou un grand type d'évolution (sols hydromorphes, sols halomorphes, sols ferrallitiques, etc). Les sous-classes sont différenciées sur des critères physico-chimiques à l'intérieur (des sols isohumiques, ferrallitiques, etc). Les sols d'un groupe ont la même disposition générale des horizons et correspondent soit au processus fondamental seul, soit à celui-ci et un ou plusieurs autres. Les sous-groupes distinguent, à l'intérieur d'un groupe soit un degré dans l'intensité d'un processus, soit une transition entre deux groupes (intergrades). Ces unités sont les unités supérieures de classification.

Les familles rassemblent dans un même sous-groupe, les sols dérivant du même matériau. Les séries sont caractérisées par le même type de profil (même disposition, épaisseur, couleur, etc des horizons), même type de drainage, de roche-mère. Cette unité est la plus commode à utiliser pour la cartographie à grande échelle. Elle porte généralement le nom du lieu où elle a été identifiée pour la première fois. Le type correspond à une granulométrie particulière de l'horizon supérieure. La phase correspond à des critères de différenciation tels que la pierrosité, la pente, le degré d'érosion. Ces unités sont les unités inférieures de la classification.

12.2. LA CLASSIFICATION FRANCAISE.

La classification des pédologues français a été proposée pour la première

fois en 1938 en vue de l'élaboration d'une carte pédologique par OUDIN. Par la suite, cette classification fut amplifiée par G. AUBERT et Ph. DUCHAUFOR et présentée par ses auteurs au congrès des sols de Paris en 1956. Cette classification fut sans cesse perfectionnée par l'un ou l'autre de ses auteurs en diverses mises au point furent présentées soit à l'occasion de réunions internationales ou de congrès. A partir de 1964, fut institué en France un Comité de pédologie et de cartographie des sols (CPCS) qui a entrepris, en vue d'une cartographie des sols de France, d'établir une classification systématique des sols qui tienne compte des acquisitions des pédologues travaillant en métropole et celles de ceux travaillant dans les zones intertropicale et méditerranéenne (ORSTOM). Ce comité a pris pour base les travaux précédents d'AUBERT et DUCHAUFOR, et procède à l'élaboration d'une classification officielle. En attendant la mise au point de cette classification, l'on exposera ici la classification publiée par G. AUBERT en 1965 et modifiée à deux reprises pour tenir compte de nouvelles données concernant les sols hydromorphes et ferrallitiques (AUBERT et SEGALIN, 1966). C'est celle qui est appliquée de longue date à Madagascar, en Afrique francophone et partout où travaillent les pédologues de l'ORSTOM. Elle permet de classer les sols jusqu'au niveau du sous-groupe. Les unités inférieures dépendent essentiellement des conditions locales et sont beaucoup trop nombreuses pour être présentées ici.

12.2.1. Classe des sols minéraux bruts.

Sous-classe des sols minéraux bruts d'origine climatique.

Groupe 1.1 des sols polygonaux des pays froids.

Sous-groupe des sols polygonaux typiques

- - - réticulés

Groupe 1.2 des sols minéraux bruts des déserts.

Sous-groupe des sols d'apport des déserts

- - - d'ablation des déserts

- - - non soumis à mouvement des déserts

Sous-classe des sols minéraux bruts d'origine non climatique.

Groupe 1.3 des sols bruts d'érosion ou squelettiques.

Sous-groupe des lithosols

- - régosols

Groupe 1.4. des sols bruts d'apport.

Sous-groupe fluviatile

- marin
- éolien
- continental (colluvial) \

Les sols de cette classe ont un profil (A) CR ou (A)C. La matière organique est pratiquement absente mais non l'activité biologique. Il n'y a pas d'évolution de la matière minérale qui reste à l'état brut souvent fragmentée mécaniquement. Les sols de cette classe sont ceux des déserts mais peuvent s'observer dans tous les autres milieux où, pour une cause ou une autre, (inondation, éruption volcanique, érosion intense et brutale) une roche massive ou divisée a été placée dans des conditions nouvelles. Avec le temps, elle sera susceptible d'évoluer dès qu'une activité biologique aura pu démarrer.

12.2.2. Classe II des sols peu évolués.

Sous-classe des sols peu évolués d'origine climatique.

Groupe 2.1. des toundras.

Groupe 2.2 des rankers.

Sous-groupe proposé : rankers alpins

- - : rankers atlantiques
- - : rankers tropicaux

Groupe 2.3 des sols subdésertiques.

Sous-groupe des sols subdésertiques modaux

- - subdésertiques faiblement salés ou alcalisés
- - subdésertiques éolisés par déflation
- - subdésertiques éolisés en microdunes

Sous-classe des sols peu évolués d'origine non climatique.

Groupe 2.4 des sols peu évolués d'érosion.

Sous-groupe des sols lithiques

- - régosoliques (régiques ou régoliques)

Groupe 2.5 des sols peu évolués d'apport.

Sous-groupe modal

- hydromorphe
- faiblement salé ou alcalisé
- vertique

Groupe 2.6 des andosols.⁽¹⁾

Les sols de cette classe présentent un horizon humifère net, parfois assez important. L'altération de la roche-mère est poussée mais il est souvent difficile, sur la simple observation du profil, de déterminer un sens d'évolution par suite d'une grande jeunesse du sol ou bien en raison de climat ne permettant pas des processus d'évolution bien tranchés.

Dans les zones méditerranéenne et intertropicale, les sols peu évolués correspondent surtout à des zones rajeunies par l'érosion (sols peu évolués d'érosion) ou des sols résultant d'apports par les cours d'eau et très souvent il s'agit de sols d'origine alluviale, par les volcans (cendres ou coulées). Dans certains pays, ces sols représentent une valeur exceptionnelle pour l'agriculture (grands deltas de la côte ouest de Madagascar, zones volcaniques du Cameroun, de l'est du Congo-Kinshasa, etc.). La faible évolution des sols se traduit en général par une richesse chimique considérable.

Les andosols correspondent à des sols dérivés de roches volcaniques divisées (cendres) et riches en allophanes. Il sont bien représentés dans les pays andins, aux Antilles, Amérique centrale, au Japon, dans certaines îles du Pacifique. Leur connaissance est jugée encore insuffisante pour qu'on propose ici des sous-groupes.

12.2.3. Classe III des sols calcomagnésimorphes.

Sous-classe des sols rendziniformes.

Groupe 3.1 des rendzines vraies.

Sous-groupe, rendzines grises ou noires

(1) - Le C.P.C.S. a décidé que les andosols constituaient une entité tellement spéciale qu'ils devaient faire l'objet d'une classe nouvelle.

Sous-groupe, rendzines blanches

- rendzines rouges
- sols humocarbonatés

Groupe 3.2 des rendzines à horizons

Sous-groupes, rendzines à humus brut

- rendzines encroûtées
- rendzines dégradées
- sols bruns calcaires
- sols bruns calcaires hydromorphes ou vertiques (3.24)

Groupe 3.3 des sols alluviaux calcimorphes

Sous-groupe, modal

- vertique

Sous-classe des sols à accumulation gypseuse.

Groupe 3.4 à accumulation gypseuse localisée

Sous-groupe à encroûtement gypseux

- à croûte gypseuse dure

Ces sols sont sous la dépendance de carbonates et sulfates de calcium et magnésium. Il s'agit de sols à profil AC ou A (B) C généralement peu épais. Les sols de la première sous-classe, rendzines, sols bruns calcaires, sont très fréquents en zone tempérée. Dans les pays de climat méditerranéen, ils sont également bien connus (Afrique du Nord, Mexique). Ils apparaissent plus rarement dans la zone intertropicale. La sous-classe des sols à accumulation gypseuse est représentée dans les sols de la région méditerranéenne.

12.2.4. Classe IV des vertisols et paraversisols.

Sous-classe des vertisols et paravertisols topomorphes (ou topo-lithomorphes).

Groupe 4.1 des vertisols et paravertisols topomorphes grumosoliques (sous-groupes identiques pour les 4 groupes :

Groupe 4.2 des vertisols et paraversisols topomorphes non grumosoliques

Sous-classe des vertisols et paravertisols lithomorphes.

Groupe 4.3 grumosoliques

Groupe 4.4 non grumosoliques.

Sous-groupe proposé pour chacun : modal

- : à caractères vertiques moyennement accentués
- : à larges concrétions d'hydromorphie
- : à caractères de salure

Les vertisols (ce nom a été emprunté à la 7^e Approximation de la classification américaine) sont des sols de couleur foncée, sans que la teneur en matière organique soit très élevée, riches en argile gonflante. Ils présentent en saison sèche de grosses fentes de retrait jusqu'à une profondeur de 50 à 80 cm. En profondeur, on observe des faces de glissement brillantes ou slickenslides, et très fréquemment des nodules calcaires. Deux sous-classes ont été distinguées suivant que les vertisols se sont développées dans de grandes plaines où les matériaux alluviaux sont déjà riches en argile gonflante, en calcium, ce sont les vertisols topomorphes; tandis que certaines roches par suite de l'abondance de silice, magnésium, calcium (basaltes, amphibolites, diorites, etc.) suffisent à fournir les matériaux nécessaires à la synthèse de ces argiles gonflantes. Des groupes ont été distingués d'après la structure de l'horizon supérieur qualifié ou non de grumosolique (structure grenue). Ces sols sont très répandus dans la zone tropicale à climat de type soudanien ou sahélien, Sénégal, Mali, Cameroun, République du Tchad, et bien d'autres. Il en est de même en zone méditerranéenne.

En Afrique du Nord, ces sols sont dénommés "tirs"; au Mexique, les vertisols sont très répandus. Les vertisols sont difficiles à cultiver en raison des très fortes teneurs en argile. Mais, ils présentent des teneurs en éléments fertilisants élevées. Le coton, le mil de décrue, des légumineuses, etc, sont les cultures les plus fréquentes.

12.2.5. Classe V des sols isohumiques.

Sous-classe des sols isohumiques à complexe partiellement désaturé.

Groupe 5.1 des brunizems,

Sous-groupe, brunizem modal

- brunizem à B textural
- brunizem à pseudogley
- brunizem vertique
- brunizem encroûté

Sous-groupe, brunizem à alcali ou à tendance solonetzique (5.16).

Sous-classe des sols isohumiques à complexe saturé.

Groupe 5.2 des chernozems

Sous-groupe, chernozem très humifère

- chernozem modal
- chernozem peu profond
- chernozem à B textural

Groupe 5.3 des sols châtaîns ou castanozems.

Sous-groupe sols châtaîns modaux

- sols châtain-rouge
- sols châtaîns vertiques
- sols châtaîns à gley ou pseudogley
- sols châtaîns encroûtés
- sols châtaîns faiblement alcalisés (ou salés)

Groupe 5.4 des sols bruns isohumiques.

Sous-groupes comme dans le groupe précédent

Sous-classe des sols isohumiques à complexe saturé.

Groupe 5.6 des sols châtaîns subtropicaux.

Sous-groupe sols châtaîns subtropicaux modaux

- sols châtain-rouge subtropicaux
- sols châtaîns subtropicaux vertiques
- sols châtaîns subtropicaux à gley ou pseudogley
- sols châtaîns subtropicaux encroûtés
- sols châtaîns faiblement alcalisés (ou salés)

Groupe 5.7 des sols bruns subtropicaux.

Sous-groupes comme dans le groupe précédent

Groupe 5.8 des sierozems (subtropicaux)

Sous-groupe sierozems modaux

- sierozems encroûtés
- sierozems faiblement alcalisés (ou salés)

Sous-classe des sols isohumiques à complexe saturé.

Groupe 5.9 des sols bruns subarides

Sous-groupe sols bruns subarides modaux .

- - brun-rouge subarides
- - bruns subarides vertiques
- - bruns subarides à pseudogley
- - bruns subarides faiblement alcalisés (ou salés)

Groupe proposé 5.92 sols brun-rouge subarides.

Les sols ischumiques sont caractérisés par une teneur progressivement décroissante dans des profils de la matière organique. Le sol est riche en cations bivalents; l'argile est de type 2 : 1; la matière organique est riche en acides humiques. Quatre sous-classes ont été reconnues. Dans la première, les sols ont un complexe partiellement désaturé. Ce sont les brunizems qu'on connaît dans le centre des U.S.A. et en République Argentine. Une autre sous-classe correspond aux sols ischumiques des régions tempérées froides avec les chernozems, sols châtaîns et sols bruns ischumiques. Une troisième sous-classe correspond à des sols saturés de climats subtropicaux et fréquents en zone méditerranéenne : les sols châtaîns, les sols bruns subtropicaux et les sierozems. La dernière sous-classe rassemble les sols ischumiques des régions tropicales subarides. Si la matière organique a les caractéristiques chimiques énoncées précédemment, les teneurs deviennent extrêmement faibles.

12.2.6. Classe VI des sols à mull.

Sous-classe des sols à "Mull" des pays tempérés.

Groupe 6.1 des sols lessivés.

Sous-groupe sols lessivés faiblement podzoliques .

- - lessivés modaux
- - bruns lessivés
- - Lessivés hydromorphes

Sous-groupe proposé sols lessivés obliquement

- - - rouges et jaunes blanchis
- - - gris forestiers
- - - lessivés à fragipan

Groupe 6.2 des sols bruns

Sous-groupe sols bruns faiblement lessivés .

- - bruns modaux

Sous-groupe sols bruns acides

- - bruns hydromorphes

Sous-groupe proposé sol brun eutrophe ou calcique

Sous-classe des sols à "Mull" des pays tropicaux.

Groupe 6.3 des sols bruns eutrophes tropicaux.

Sous-groupe proposé modal

- - vertique

- - hydromorphe

- - ferruginisé

- - peu évolué

Les sols de cette classe sont appelés également sols brunifiés à humus doux ou mull. L'argile et l'humus forment des agrégats peu stables. La migration de l'argile est possible. Un complexe argile-fer-humus donne au sol une couleur brune. La libération du fer est peu visible.

Une première sous-classe rassemble les "sols bruns" des pays tempérés, lessivés ou non. La deuxième sous-classe comprend les sols bruns eutrophes des régions tropicales. Il s'agit de sols associés à des roches riches en calcium (basaltes, amphibolites, diorites). Leur structure est à tendance cubique, leur réaction neutre. Le niveau de fertilité est élevé, aussi ces sols sont-ils très recherchés pour l'agriculture (cultures vivrière ou d'exportation).

12.2.7. Classe VII des podzols et sols podzoliques.

Sous-classe des sols à "Mor" enrichis en sesquioxydes sans horizon de gley en profondeur.

Groupe 7.1 des podzols

Sous-groupe podzols humiques humiques

- podzols humo-ferrugineux

- podzols ferrugineux

- podzols à alics

Groupe 7.2 des sols podzoliques

Sous-groupe sols podzoliques humifères

- - podzoliques ferrugineux

- - podzoliques à pseudogley

Sous-groupe sols podzoliques à accumulation diffuse

- - podzoliques à lessivage oblique

Sous-groupe proposé sols micro-podzoliques

Groupe 7.3 des sols ocres podzoliques

Sous-groupe modal

- lessivé

Groupe 7.7 proposé sols crypto-podzoliques.

Sous-classe des sols à "Mor" enrichis en sesquioxydes à horizon de gley en profondeur.

Groupe 7.4 des podzols à gley

Sous-groupe modal

- alios

Groupe 7.5 des pseudo-podzols de nappe.

Groupe 7.6 des sols podzoliques à gley.

Sous-groupe à taches, marbrures et concrétions

- à alios

- à fragipan

Les sols podzoliques et les podzols sont des sols de pays à climats froids et tempérés où les horizons humifères sont très fréquemment des humus grossiers susceptibles de fournir les complexants qui véhiculent le fer, l'alumine vers la profondeur, (à travers un horizon A_2 , blanc, cendreuse) où s'accumulent des hydroxydes et de la matière organique.

En fait, si les sols de cette classe sont essentiellement des sols de pays froids et tempérés, dans un certain nombre de cas dans les pays des zones tropicales et équatoriales, des podzols sont connus. L'horizon A_2 est alors très développé (1 m à 2 m) et un véritable alios humo-ferrugineux est connu. De tels sols sont décrits en Côte d'Ivoire, à Madagascar, en Guyane, sur les sables côtiers.

Avec les 2 classes suivantes, on pénètre dans les sols caractéristiques de la zone intertropicale avec la propriété de présenter un enrichissement notable en hydroxydes de fer et alumine. Simultanément, la matière organique subit une décomposition rapide, tout au moins à basse altitude.

12.2.8. Classe VIII des sols fersiallitiques.

Sous-classe des sols rouges et bruns méditerranéens.

Groupe 8.1 des sols rouges méditerranéens non lessivés.

Sous-groupe modal

- encroûté
- hydromorphe
- vertique
- steppisé

Groupe 8.2 des sols rouges méditerranéens lessivés.

Sous-groupe modal

- encroûté
- hydromorphe
- vertique
- à lessivage oblique

Groupe 8.3 des sols bruns méditerranéens

Sous-groupe proposé, modal

- - hydromorphe à pseudogley
- - vertique

Sous-classe des sols ferrugineux tropicaux.

Groupe 8.4 des sols ferrugineux tropicaux non ou peu lessivés

Sous-groupe sols à teneur constante en sesquioxydes de fer

- - un peu lessivés en composés du fer
- - ~~ferrugineux~~ tropicaux jeunes

Groupe 8.5 des sols ferrugineux tropicaux lessivés.

Sous-groupe sans concrétions

- à concrétions
- hydromorphe
- induré

Une définition générale, de la première classe, celle des sols fersiallitiques, pourrait être la suivante :

1. Une altération aussi complète des mêmes minéraux primaires que précédemment, mais portant sur une épaisseur beaucoup moins grande.

Mêmes possibilités de minéraux hérités et de quartz résiduel.

2. Les produits de synthèse sont caractérisés par une élimination moins poussée de la silice qui devra se retrouver plus abondante dans les produits de synthèse du sol (cristallins ou amorphes).

- . silicates de la famille de la kaolinite encore abondants mais apparition de minéraux 2 : 1 en quantité souvent forte. Les sols de cette classe sont ceux pour lesquels PEDRO (1966) propose le terme "bisiallitisations".
- . absence d'hydroxydes d'alumine.
- . présence d'hydroxydes et oxydes de fer et produits divers (comme le bioxyde de manganèse).

3. Profil A B C

Horizon A. Matière organique bien évoluée, présence très fréquente d'un A_2 .

B. Minéraux primaires autres que quartz rares; minéraux hérités abondants parfois, structuration souvent accusée.

La sous-classe des sols méditerranéens est actuellement divisée en trois groupes pour tenir compte de possibilité de lessivage et de la coloration brune de certains sols. Il faut rapprocher de ces sols certains sols rouges tropicaux (MARTIN et al. 1967). Par ailleurs, cette sous-classe est en cours de révision et il est possible que la présentation des sols soit modifiée prochainement.

Les conditions de formation de ces sols sont assez controversées. Certains auteurs pensent qu'ils sont fossiles, LAMOUROUX (1965) montre, au contraire, qu'ils se forment actuellement en quelques points pluvieux du bassin méditerranéen. Pour d'autres, ils sont en cours d'évolution lente depuis fort longtemps. Leur chimisme est également fort discuté depuis que REIFENBERG (1947) a parlé de complexes ferro-siliciques dont l'existence demeure, il faut bien le dire, fort hypothétique. Quoiqu'il en soit, il s'agit de sols peu acides ou neutres, le plus souvent saturés, où les minéraux argileux sont variés ; kaolinite, illite et (ou) montmorillonite. Seule, cette dernière apparaît se former dans les conditions actuelles; les autres minéraux sont hérités. Le fer est sous forme d'hydroxydes cristallisés ou amorphes, ou inclus dans le réseau des minéraux argileux.

La matière organique est relativement peu abondante. Le calcaire peut précipiter à la base des profils. La possibilité de lessivage de l'argile n'est pas également admise par tous.

Les sols rouges et bruns méditerranéens sont généralement abondamment cultivés en vigne, cultures vivrières.

Les sols ferrugineux tropicaux sont subdivisés en deux groupes peu ou pas lessivés et lessivés.

Ils présentent une individualisation de produits ferrugineux, souvent suivie d'une migration plus ou moins importante. Les minéraux argileux sont surtout la kaolinite associée à des proportions variables de minéraux 2 : 1. Le degré de saturation est légèrement plus faible que celui des sols méditerranéens. La matière organique présente souvent un rapport C/N de l'ordre de 15 à 17. Le profil présente fréquemment un horizon A₂ appauvri en fer et en argile.

La topographie plane étant la règle pour ces sols, l'hydromorphie est presque toujours associée aux sols ferrugineux tropicaux avec pour résultat une mobilité très nette du fer.

Les sols ferrugineux tropicaux servent à la culture des plantes vivrières de la zone soudano-sahélienne, ainsi qu'au sisal, au cotonnier.

12.2.9. La classe des sols ferrallitiques peut être définie en quelques lignes de la manière suivante :

Sols à profil A (B) C ou A B C, le plus souvent très épais; présentant généralement une décomposition poussée de la matière organique, alors très liée à la matière minérale, et une très forte altération des minéraux résultant d'une libération importante de sesquioxyde de fer, manganèse et même, assez souvent aluminium; élimination poussée de la silice, d'où un rapport silice/alumine 2; minéraux argileux constitués, en plus des sesquioxydes de fer et aluminium, etc, de kaolinite et, parfois, de traces d'illite; présence possible de minéraux hérités résiduels; matériau originel (horizon C) constitué de minéraux très altérés s'écrasant facilement; capacité d'échange faible; degré de saturation le plus souvent faible ou moyen, rarement élevé en B ou (B); structure variable de B, parfois peu nette, mais friabilité élevée de cet horizon.

La classe est divisée en trois sous-classes d'après les caractéristiques du complexe absorbant (degré de saturation, somme des bases fixées, pH). Les groupes correspondent soit au processus fondamental, soit à celui-ci auquel sont venus s'adjoindre d'autres comme accumulation de matière organique, hydromorphie, induration, etc.

Les sols pénévoués constituent des groupes de sols ferrallitiques dont le degré d'évolution n'est pas aussi poussé que celui des sols environnants (profil moins épais, plus grande richesse en bases, en matière organique, etc.) par suite de la présence abondante de minéraux difficilement altérables comme l'illite, de rajeunissement par l'érosion, le recouvrement par des alluvions, des cendres volcaniques, etc.

Sous-classe 1. Sols ferrallitiques faiblement désaturés en (B).

teneur en bases échangeables 2 à 8 mé pour 100 g

degré de saturation 40 à 70 % parfois monte jusqu'à près de 80 %

pH 5,5 à 6,5

Groupe 9.11. Typique : profil constitué par une succession d'horizons de texture relativement constante sur toute l'épaisseur du sol; teneur assez faible en matière organique bien évoluée.

Sous-groupes :

- modal
- induré : horizon B durci en carapace ou cuirasse, non dû à l'action d'une nappe
- hydromorphe : horizon de gley ou pseudogley à la base de A ou dans la partie supérieure de B
- faiblement rajeuni ou pénévoué, relativement riche en minéraux altérables
- humique (matière organique > 3 %)

Groupe 3.13. Sols ferrallitiques faiblement désaturés appauvris. Horizon A plus pauvre en argile que l'horizon (B) sans qu'il y ait un véritable horizon d'accumulation (indice d'appauvrissement au moins de 1/1,4).

Sous-groupes :

- modal
- induré
- hydromorphe
- faiblement remanié; sols dont l'horizon A, plus pauvre en argile est de teneurs, dans les diverses classes de sables, relativement différentes de ce qu'elles sont en (B)

Groupe 9.14. Sols ferrallitiques faiblement désaturés remaniés. Horizon A de

classes texturales relativement peu différentes de ce qu'elles sont en B; présence fréquente d'un lit de cailloux et graviers non roulés à la base de A.

Sous-groupes :

- modal
- induré
- hydromorphe
- faiblement rajeuni ou pénévolué
- éluvié, sols présentant à la limite de A et de (B) un horizon très riche - relativement à A et (B) - en éléments grossiers: sables grossiers, graviers, concrétions, etc provenant d'une véritable "fonte" de l'horizon B, du sol initial; sol toujours très vieux

Groupe 9.15. Sols ferrallitiques faiblement désaturés rajeunis ou pénévolus; sols ayant tous les caractères des sols ferrallitiques faiblement désaturés, mais relativement plus riches en minéraux altérables, en particulier après érosion et réévolution du sol ainsi tronqué :

Sous-groupes :

- avec apport éolien
- hydromorphe
- avec érosion et remaniement

Ces sols peuvent être observés dans les régions à climat guinéen et soudanien où la pluviométrie peut s'abaisser à 1,0 - 1,2 m.

Les cultures possibles sont les cultures vivrières, comme le mil, le manioc, l'arachide, les cultures d'exportation, surtout le coton.

Sous-classe 2. Sols ferrallitiques moyennement désaturés en (B).

teneurs en bases échangeables :	1 - 3 mé pour 100 g
degré de saturation	: 20 à 40 %.
pH	: 4,5 à 6.

Groupe 9.21. Typique.

Sous-groupe :

- modal
- jaune (horizon B), le plus souvent en bas de pente

- induré
- hydromorphe
- faiblement rajeuni ou pénévolué
- faiblement appauvri
- humique : teneur en matière organique $> 3 \%$

Groupe 9.22. Humifère. Sols riches en matière organique bien évoluée (au moins 7 % sur 20 cm ou plus de 1 % jusqu'à au moins 1 m de profondeur); sols pauvres en allophane même s'ils sont formés sur roche volcanique; structure grumeleuse à grenue dans tout l'horizon humifère.

Sous-groupes :

- à horizon humifère très contrasté. Horizon humifère très foncé au-dessus d'horizons (B) rouges ou brun-rouge
- à horizon humifère A très profond. Horizon A de couleur brune occupant la plus grande partie du profil et passant très progressivement aux horizons sous-jacents de couleur différente
- rajeuni, en particulier par des apports éoliens de minéraux altérables (éléments volcaniques)

Groupe 9.23. Sols ferrallitiques moyennement désaturés appauvris.

Sous-groupes :

- modal
- jaune
- induré
- hydromorphe
- faiblement remanié

Groupe 9.24. Sols ferrallitiques moyennement désaturés remaniés.

Sous-groupes :

- modal
- jaune
- induré
- hydromorphe
- faiblement rajeuni ou pénévolué
- éluvié

Groupe 9.25. Sols ferrallitiques moyennement désaturés rajeunis ou pénévolus.

Sous-groupes :

- avec apport éolien
- hydromorphe
- avec érosion et remaniement

Les sols de cette sous-classe sont représentés dans les zones au climat tropical de type guinéen ou bien tropical d'altitude : Cameroun Central, Hauts plateaux malgaches, etc.

L'utilisation est voisine de celle des sols précédents : cultures vivrières (maïs, haricots), cultures d'exportation (palmier à huile, caféiers (*C. robusta* et *C. arabica*), cacaoyer).

Sous-classe 3. Sols ferrallitiques fortement désaturés en (B).

Sols le plus souvent très profonds; teneur en bases échangeables < 1 mé pour 100 g; degré de saturation < 20 %; pH $< 5,5$; pH de A inférieur à celui de B (sauf parfois sous culture).

Groupe 9.31. Typique.

Sous-groupes :

- modal
- jaune (horizon B), aussi bien en position de palteau qu'en bas de pente
- induré
- hydromorphe
- faiblement rajeuni ou pénévolué
- faiblement appauvri
- humique

Groupe 9.32. Humifère.

Sous-groupes :

- modal
- sols brun foncé très acides, gibbsitiques

Groupe 9.33. Sols ferrallitiques fortement désaturés appauvris.

Sous-groupes :

- modal
- jaune
- induré
- hydromorphe
- faiblement remanié

Groupe 9.34. Sols ferrallitiques fortement désaturés remaniés.

Sous-groupes :

- modal
- jaune
- hydromorphe
- faiblement rajeuni ou pénévolué

Groupe 9.35. Sols ferrallitiques fortement désaturés rajeunis ou pénévolus.

Sous-groupes :

- avec apport éolien
- hydromorphe
- avec érosion et remaniement

Groupe 9.36. Lessivé.

Sols présentant un horizon B textural qui ne représente que la partie supérieure de l'horizon (B) total du sol. Indice de lessivage de au moins 1/1,4; présence d'argile orientée visible sinon sous forme de revêtements des agrégats qui sont très rares, au moins sous forme de revêtements dans les canalicules et pores.

Matière organique moyennement ou peu décomposée, formant souvent des complexes avec les oxydes métalliques.

Sous-groupes :

- modal
- podzolisé. Humus grossier. Horizon A₂ très clair; tendance un peu cendreuse
- induré
- hydromorphe

Les sols ferrallitiques fortement désaturés correspondent typiquement au climat équatorial et sont connus le long du littoral de la côte occidentale d'Afrique,

au Congo, au Gabon, sur la côte est de Madagascar. La couleur de l'horizon B est généralement jaune-orangé. Ils sont cultivés en hévéa, palmiers à huile, ananas.

12.2.10. Classe X des sols halomorphes.

Sous-classe des sols halomorphes à structure non dégradée.

Groupe 10.1 des sols salins

Sous-groupe sols salins à encroûtement

- - - à horizon superficiel friable
- - - acidifiés (oxydation des sulfures)

Sous-classe des sols halomorphes à structure dégradée.

Groupe 10.2 des sols à alcali non lessivés

Sous-groupe sols très salés à alcali

- - peu ou moyennement salés à alcali

Sous-groupe proposé sols très salés à alcali à hydromorphie

Groupe 10.3 des sols à alcali lessivés.

Sous-groupe solonetz à structure en colonnettes de l'horizon B

- - - prismatique ou massive du B

Groupe 10.4 proposé des sols à alcali à argile dégradée

Sous-groupe proposé solonetz solodisés

- - - - à action de nappe
- - solods

Les sols halomorphes sont subdivisés en deux classes. Les sols de la première renferment des teneurs notables en sels solubles (chlorures, sulfates). La structure n'est pas modifiée et le sodium n'est pas fixé sur le complexe de manière importante.

Un système d'irrigation et surtout de drainage doit permettre le dessalage et la mise en culture de ces sols, présents en abondance dans la zone méditerranéenne et en différents points près des côtes dans la zone intertropicale.

Les sols de la deuxième sous-classe voient une fixation abondante de sodium sur le complexe absorbant et une modification corrélative des propriétés physiques.

Des structures massives ou en colonnettes apparaissent rendant extrêmement difficile le travail du sol.

L'utilisation de ces sols implique une amélioration de la structure par un sous-solage coûteux et une mobilisation du sodium par un traitement avec du sulfate de calcium, du soufre, du chlorure de calcium. Ces sols sont présents dans la zone méditerranéenne, et les parties les plus sèches de la zone intertropicale (cuvette tchadienne).

12.2.11. Classe XI des sols hydromorphes.

Sous-classe des sols hydromorphes organiques.

Groupe 11.1 des sols tourbeux.

Sous-groupe sols tourbeux oligotrophes

- - - eu-ou mésotrophes

Sous-classe des sols hydromorphes moyennement organiques.

Groupe 11.2 des sols humiques à gley.

Sous-groupe sols humiques à gley, salés

- - - à anmoor acide

- - - à anmoor calcique

Sous-classe des sols hydromorphes minéraux ou peu humifiées.

Groupe 11.3 des sols hydromorphes peu humifères à gley.

Sous-groupe sols à gley de surface ou d'ensemble

- - - de profondeur

- - - salés

- - - lessivés

Groupe 11.4 des sols hydromorphes peu humifères à pseudogley

Sous-groupe sols à taches et concrétions

- - à carapace ou cuirasse

Groupe 11.5 sols hydromorphes peu humifères à redistribution du calcaire et gypse

Sous-groupe sols à nodules calcaires ou gypseux

- - à encroûtement ou croûte calcaire, ou gypseux

Les sols hydromorphes organiques sont des sols observés dans des zones où le niveau de l'eau est au-dessus de la surface du sol, mais n'empêche pas le développement de la végétation. La matière organique est peu décomposée. Les propriétés, telles que les teneurs en bases échangeables, permettent de classer ces sols en oligotrophes et eu- ou mésotrophes. Les premiers sont représentés en Côte d'Ivoire (Marais de l'Agneby), à Madagascar (Lac Alaotra). Les seconds doivent leurs propriétés à l'influence d'une roche-mère calcaire proche et existent dans les parties sèches des zones intertropicale et méditerranéenne.

Les sols hydromorphes moyennement organiques ont un horizon organique bien évolué et généralement de type anmoor. Ces sols présentent un degré de fertilité variable dépendant du bassin versant qui alimente les rivières qui intéressent les sols. On les observe au Cameroun (plaine du Noun), à Madagascar (région de Marovoay), etc.

Les sols hydromorphes minéraux sont très communs qu'ils soient à gley ou à pseudo-gley, en zone intertropicale. En région méditerranéenne, le calcaire, le gypse prédominent dans de nombreux sols hydromorphes.

La mise en valeur de ces sols, complètement ou partiellement immergés par l'eau, implique une maîtrise de celle-ci (assainissement, irrigation). Les cultures préconisées sont alors celles qui s'accommodent de conditions plus ou moins humides, comme le bananier, et surtout le riz.

12.3. AUTRES CLASSIFICATIONS EN AFRIQUE TROPICALE.

Au cours des vingt dernières années, les pédologues belges, portugais et britanniques ont procédé à des travaux de cartographie dans différents pays d'Afrique tropicale. Ils ont mis au point des systèmes de classification qui sont examinés dans le paragraphe suivant. On essaiera de rattacher les unités reconnues avec celles de la classification française.

. La classification belge.

Les pédologues belges travaillant au Congo ont mis au point une classification qui a été utilisée, dans la cartographie pédologique pendant plusieurs années et fut présentée par SYS et al en 1960.

Des horizons génétiques sont décrits qui s'apparentent aux horizons de diagnostic de la classification américaine.

Horizon mélanique paraît équivalent de horizon mollique

Horizon A₁ fort paraît se rapprocher de horizon umbrique

Horizon A₁ faible paraît se rapprocher de horizon ochrique.

Les horizons de profondeur représentent des subdivisions du B ferrallitique. La partie supérieure (environ 75 cm) présente une meilleure structure et une consistance plus forte et est appelée B structural ou B de consistance, tandis que la partie inférieure du B ferrallitique est décrite comme C (ce qui n'est pas le cas dans la classification française).

Dans la classification elle-même, un certain nombre d'ordres ont été reconnus qui tiennent compte des différences dans l'altération et le développement du profil. Les sous-ordres tiennent compte essentiellement du pédoclimat. L'équivalent des sols ferrallitiques est représenté par les Kaolisols qui occupent 90 % de la superficie du Congo : hygrokaolisols, hygroxerokaolisols et xérokaolisols paraissent proches des trois sous-classes des sols ferrallitiques. Les hydrokaolisols sont en fait des sols hydro-morphes.

Les matériaux ferrisoliques déterminent la formation de groupes spéciaux qui correspondent à une évolution moindre que celle des matériaux très évolués des ferralsols.

Les ferrisols ont un rapport limon/argile élevé. Ils présentent des revêtements argileux sur les agrégats, avec une structure anguleuse bien développée. La kaolinite est le minéral dominant mais des argiles illitiques peuvent être présentes, tandis que la gibbsite n'en est qu'à l'état de traces.

Les ferralsols ont au contraire un rapport limon/argile faible (inférieur à 0,2); pas de revêtement argileux, une structure grumeleuse fine; des minéraux argileux essentiellement kaolinitiques sans illite; possibilité de gibbsite plus ou moins abondante.

Les ordres suivants ont été reconnus par les pédologues belges au Congo (les équivalents les plus probables de la classification française).

Sols non développés (minéraux bruts)

Sols tropicaux récents (sols peu évolués)

Sols noirs tropicaux (vertisols)

Sols bruns tropicaux (sols bruns eutrophes)

Sols lessivés récents (sols à mull)
Sols podzoliques (podzols et sols podzoliques)
Kaolisols (sols ferrallitiques)
Kaolisols lessivés (sols ferrallitiques lessivés)
Sols organiques.

• La classification des pédologues britanniques au Ghana.

Il est sans doute excessif de voir dans cette classification une classification britannique applicable à l'Afrique tropicale. Le système utilisé a été mis au point au Ghana sous l'impulsion de C.F. CHARTER et généralisé par H. BRAMER, WILLS, 1967)... Plusieurs niveaux ont été reconnus. Les ordres sont au nombre de quatre.

"Climatophytic earths". Les sols sont formés essentiellement sous l'influence du climat et de la végétation.

"Topoclimatic earths". L'influence du relief et du climat est prépondérante.

"Topohydric earths". Le relief et le drainage sont responsables de la pédogenèse.

"Lithochronic earths". L'influence de la roche-mère et de l'âge est la plus importante.

Les grands ordres sont subdivisés en sous-ordres, en relation avec la pénétration de l'eau pour le premier ordre, la nature de la topographie pour le troisième, un facteur retardant le développement pour le quatrième. Il n'y a pas de subdivision pour le 2ème ordre. Chaque sous-ordre est subdivisé en "famille de groupes" et chaque "famille de groupes" en groupes.

Quelques groupes particuliers méritent une présentation spéciale.

Les "ochrosols de forêt" sont des sols rouges, bruns ou rouge-brun. Ce sont les plus répandus des sols du Ghana forestier. Ils dérivent de roches variées; leur horizon humifère est relativement riche en éléments fertilisants. Les "oxydols de forêt" ont une couleur plus pâle et correspondent aux zones les plus pluvieuses du pays. Les bases échangeables sont faibles dès la surface. Ces sols doivent pouvoir se comparer aux sols ferrallitiques moyennement et fortement désaturés. Les "ochrosols de savane" sont répandus dans le nord du pays et paraissent correspondre aux sols ferrallitiques faiblement désaturés et sans doute pour partie à des sols ferrugineux tropicaux. Les "rubrisols"

peuvent être rapprochés des sols ferrallitiques faiblement désaturés et des sols fersiallitiques (rouges tropicaux).

Les "tropical black earths" sont analogues aux vertisols et les "Brunosols" des sols bruns eutrophes. Les "tropical grey earths" paraissent avoir beaucoup d'affinités avec les "solonetz solodisés". Les sols rassemblés sous le nom de "depressiopedes" sont à rapprocher des sols hydromorphes et des sols halomorphes.

. La classification portugaise.

Les pédologues portugais, à la suite de leurs prospections en Mozambique, Angola et dans les îles volcaniques de Principe et Sao Tomé, ont mis au point une classification dont les unités principales sont :

Des lithosols, regosols, à profil (A)C qui peuvent être assimilés aux sols minéraux bruts.

Des sols alluviaux, lithologiques, à profil AC qui correspondent aux sols peu évolués.

Des "Barros pretos" ou sols noirs tropicaux qui sont les équivalents des vertisols.

Des sols bruns tropicaux, qu'on peut rapprocher des sols à mull tropicaux (ou sols bruns eutrophes).

Des sols fersiallitiques tropicaux. Ces sols sont à rapprocher des sols ferrugineux tropicaux et des sols rouges tropicaux.

Les sols ferrallitiques qui correspondent dans leurs grandes lignes à ceux de la classification française. Les sols para-ferrallitiques sont très proches des sols pénévolus et des ferrisols de SYS.

12.4. LES CLASSIFICATIONS AMERICAINE ET RUSSE.

. La classification américaine. La première classification américaine est l'oeuvre de MARBUT en 1921. Elle apporte, par rapport aux classifications en usage à cette époque, une distinction fondamentale entre les "pedocal" ou sols placés sous la dépendance du calcaire et les "pédalfer" où aluminium et fer contribuaient à donner aux sols leurs caractéristiques essentielles. Dès 1938, la classification prenait une forme plus classique avec les trois ordres "zonal, intrazonal et azonal" et des sous-ordres fondés sur des caractéristiques pédoclimatiques. Les sols de la zone intertropicale y étaient faiblement représentés. Peu à peu, le monde tropical était étudié par les pédologues américains qui étudiaient les sols de Cuba, des Hawaii, de divers pays d'Amérique du Sud et

d'Afrique. En 1948, CLINE publie une classification des sols des Hawaii; en 1949, KELLOGG et DAVOL présentent une classification des sols du Congo Belge.

En 1960, au moment du Congrès international de Science du sol de Madison, Wisconsin, les pédologues américains présentèrent une nouvelle classification qui voulait se fonder sur les caractères mesurables (physico-chimiques et morphologiques) et rassembler les sols d'après leur parenté génétique qui traduit l'influence du milieu. Deux nouveautés importantes, mais assez différentes, apparurent dans cette classification : les horizons de diagnostic et une terminologie aux consonnances parfois étranges.

Les horizons de diagnostic ont été présentés dans le chapitre 2; ils sont énumérés ici en donnant leurs équivalents les plus probables dans la terminologie française.

Epipédons

mollique	: mull calcaïque
umbrique	: mor, moder, anmoor épais
histique	: hydromor ou tourbe
ochrique	: mull ou moder peu épais; paraît convenir aux horizons A ₁ des sols ferrallitiques
plaggen	: horizon organique artificiel, créé par l'activité humaine.

Horizons de profondeur.

argillique	: l'horizon B textural s'en rapproche le plus.
agrique	: pas d'équivalent (horizon créé par la culture et les activités humaines).
natrrique	: horizon d'argile sodique.
spodique	: horizon B des podzols (accumulation de produits organiques et minéraux)
cambique	: horizon altéré (B).
oxique	: horizon riche en sesquioxydes des sols ferrallitiques.

Des horizons diagnostiques d'importance secondaire sont :

duripan	: horizon fortement durci
fragipan	: horizon durci à l'état sec, cassant à l'état humide.

calcique	: horizon enrichi en calcaire
salique	: horizon enrichi en sels solubles
gypsique	: horizon enrichi en gypse
albique	: horizon A ₂ très lessivé
plinthite	: horizon tacheté

La nomenclature.

Dix ordres ont été distingués qui s'appuient sur la présence ou l'absence de différents horizons de diagnostic. Leur nom est parfois inventé de toutes pièces et s'appuie sur des termes le plus souvent latins ou grecs. Pour obtenir les sous-ordres, à la syllabe correspondant à l'ordre, on en ajoute une autre relative au climat du sol; les groupes s'obtiennent en ajoutant une troisième syllabe relative à un horizon de diagnostic ou au climat.

C'est ainsi que les 10 ordres suivants ont été présentés :

équivalents approximatifs de la
classification française

Entisols	: sols minéraux bruts
Vertisols	: Vertisols
Inceptisols	: sols peu évolués, certains sols bruns
Aridisols	: Sierozems, bruns sierozems, solontchaks, solonets.
Mollisols	: sols calcomagnésimorphes sols isohumiques
Spodosols	: sols podzoliques, podzols
Alfisols	: sols à Mull.
Ultisols	: différents sols fersiallitiques
Oxisols	: Sols ferrallitiques
Histosols	: Sols hydromorphes organiques.

Un certain nombre de syllabes sont utilisées pour désigner les sous-ordres : "Aqu" hydromorphe; "Ust" de climat sec; "ud" de climat humide; "hum" riche en matière organique; "and" contenant des matériaux de type allophane; "psamm" riche en sable, etc.

Pour les grands groupes, on ajoute de nouvelles syllabes.

Normudalf : ordre alfisol, sous-ordre "ud" (à climat humide) "norm (normal) : sol brun lessivé.

La classification américaine présente plusieurs ordres sans horizons de diagnostic de profondeur comme les entisols, les vertisols, les aridisols. L'horizon mollique caractérise les mollisols; l'horizon spodique les spodosols; l'horizon argillique les alfisols, les ultisols; l'horizon oxisol, les oxisols.

Il n'existe pas de classe "halomorphe"; les sols marqués par les sels ou l'acidification sont répartis dans différents ordres au niveau du groupe marqué par le préfixe "natr".

Ex. un solonetz solodisé est natralboll (ordre mollisol, sous-ordre : à horizon albique; groupe à horizon natrique); un sol à alcali (solonetz) est natrustoll.

Il n'existe pas non plus de classe "hydromorphe". Les sols hydromorphes sont répartis dans différents ordres et l'hydromorphie se marque au niveau du sous-ordre par "aqu":

Aquox : sol hydromorphe associé au sols ferrallitiques

Hydraquent : sol à gley, de marais.

En 1960, la classification américaine apparaissait très précise pour tous les ordres des pays tempérés (tels que alfisols, spodosols, mollisols, etc.) mais les difficultés restaient sérieuses pour y faire entrer tous les sols des pays tropicaux. En 1964, G. SMITH procéda à une révision des groupes relatifs aux pays tropicaux. La classification américaine accorde cependant, pour les pédologues français, une importance excessive à certains caractères non liés directement aux processus évolutifs en particulier la nature de la roche-mère (sables) et au climat qui sont utilisés pour différencier des sols au niveau des sous-ordres.

. La classification russe.

La première classification des sols a été présentée par DOKUCHAEV en 1886. Il distinguait des sols "normaux", "transitionnels" et "anormaux". Les subdivisions suivantes s'appuyaient sur l'origine des sols, les zones climatiques et la matière organique. Différentes classifications furent présentées successivement par SIBIRTSEV (1895) qui posa la loi de zonalité, et distingua des sols zonaux, intrazonaux et azonaux;

par GLINKA (1908) pour lequel le climat servait à différencier les sols; KOSSOVICH (1911) qui établit la notion de type de formation du sol (désert, steppe aride, steppe ou chernom, podsolique, toundra, latéritique). En 1925, NEUSTRUEV distingue des sols "automorphes" dépendant essentiellement du climat et "hydromorphes" liés à une nappe proche de la surface. D'autres classifications furent établies par POLYNOV puis GERASIMOV; ZAVALISHIN et IVANOVA (1934) pour lesquels l'eau et le drainage ont une importance considérable. D'autres classifications comme celles de SABANIN (1909) liaient étroitement le sol à la végétation; GEDROIT (1925), au contraire, établissait une classification sur les caractéristiques du complexe absorbant.

Une classification récente est celle de IVANOVA et ROZOV (1956) présentée par la suite au Congrès de Science du Sol de Madison.

Cette classification prévoit d'abord des "groupes globaux" qui ont essentiellement une valeur géographique et par conséquent climatique qui oriente de manière précise la pédogénèse. Les "groupes globaux" suivants ont été reconnus : Polaire, boréal, sub-boréal, sub-tropical, tropical.

A l'intérieur de ces "groupes globaux", apparaissent des classes liées encore au climat et à la végétation. Par exemple, dans le groupe global tropical, trois classes sont distinguées d'après le climat et la végétation : sols des déserts tropicaux, sol des régions tropicales à savanes et forêts sèches, sols des régions tropicales à savanes et forêts humides.

A l'intérieur de chaque "classe", apparaissent des sous-classes fondées sur la végétation ou un grand processus pédogénétique. A l'intérieur de chaque "sous-classe" sont distingués des "types" où les sols sont automorphes, semi-hydromorphes et hydromorphes. C'est à ce niveau qu'apparaissent les "groupes" de la classification française et américaine.

Dans cette classification apparaît de manière frappante l'importance accordée à la géographie, au climat et à la végétation. Ces caractéristiques qui apparaissent à un haut niveau dans la classification russe sont considérées comme des facteurs de formation du sol dans la classification française où ils ne sont pas intégrés dans la classification elle-même. Il apparaît que les "types" sont assez proches des groupes connus ailleurs. On a donné récemment à des facteurs tels que la géomorphologie, l'âge du sol, l'importance qu'ils méritent (KOVDA, 1964).

GROUPE GLOBAL DE CLASSES DE FORMATION DE S O L S T R O P I C A U X

Classes	Sous-classes	Types		
		Automorphes	Semi-hyrrmorphes	Hydromorphes
10. Sols des déserts tropicaux	Désert Tropical	Sols des déserts tropicaux Sols brun-rouge de savanes désertifiées	Sols brun-rouge de prairies	
	Solontchak			Solontchak tropicaux
11. Sols des forêts et savanes sèches	1. Sols rouges tropicaux	Sols brun-rouge des savanes Sols brun-rouge	Sols brun-rouge des savanes (humides de prairie) id	
	2. Sols sous herbes basses (Sod)	Sols noirs de savane (Vertisols)		
	3. Sols tropicaux de prairies			Sols tropicaux de prairies
	4. Solonetz tropicaux		Solonetz tropicaux	
12. Sols de forêts et savanes humides	Latérite	Sols rouges de savanes humides Sols latéritiques	Sols rouges à gley Sols latéritiques à gley	
	Sols de marais tropical			Sols tropic de marais

. CONCLUSION.

Les différentes classifications présentées montrent qu'un effort particulier a été effectué ces dernières années pour aboutir à une définition précise des horizons de diagnostic, dans le but d'identifier avec certitude les sols examinés sur le terrain.

Il apparaît, par ailleurs, que les différences les plus importantes se situent au niveau des classes et sous-classes (ou ordres et sous-ordres) et de la présentation générale des sols. Toutes les classifications se veulent "morphogénétistes", mais on trouve encore souvent à un niveau très élevé des critères tels que climat, végétation et nappe phréatique actuelle. On sait maintenant combien ont varié et varient encore de nos jours ces trois facteurs, il apparaît aux pédologues français, et plus spécialement à ceux qui travaillent dans les zones intertropicale et méditerranéenne, qu'il est préférable de classifier les sols sur les caractères actuels visibles et mesurables que nous leur voyons.

Par contre, au niveau des groupes, les corrélations apparaissent beaucoup plus commodes, et il semble que les comparaisons doivent se faire beaucoup plus facilement à ce niveau.

C h a p i t r e 13

LA CARTOGRAPHIE PEDOLOGIQUE

13.1. Définition de la carte pédologique.

13.2. Caractéristiques et types de carte.

13.2.1. Echelles

13.2.2. Précision

13.2.3. Les types de cartes pédologiques

13.2.4. Les cartes issues des cartes pédologiques.

13.3. Etablissement d'une carte pédologique.

13.3.1. Documents à étudier

13.3.2. Facteurs de formation du sol

13.3.3. Les photographies aériennes et leur utilisation

13.3.4. Etablissement des itinéraires, densité des observations.

13.4. Utilités de la carte pédologique

13.4.1. Buts analytiques

13.4.2. Prévisions.

13.5. Bibliographie

I. La carte pédologique est un document qui a pour but de donner une image aussi fidèle que possible de la nature, de la localisation et de la répartition des catégories de sols étudiés.

La carte pédologique est un document, généralement en couleurs, avec une légende, accompagnée d'une notice explicative. Les plages de couleur représentent les unités pédologiques reconnues. Celles-ci vont de la classe à la phase, suivant l'échelle et le degré de précision avec lequel le travail a été fait.

On peut avoir des unités simples, c'est-à-dire que les unités reconnues couvrent au moins de 80 % de la surface considérée. On peut avoir également des unités complexes. Les juxtapositions concernent différentes unités entremêlées de telle sorte, qu'à l'échelle de la carte, on ne peut les différencier. Dans une séquence, les sols se succèdent dans un ordre déterminé par suite de conditions particulières (de roche-mère par exemple). Dans une chaîne, chaque sol est relié génétiquement au précédent et au suivant.

Chaque unité reconnue est affectée d'une couleur et de signes en noir. Le choix des couleurs a été fait de la manière suivante, adopté par la Section de Pédologie de l'ORSTOM.

Les sols minéraux bruts n'ont pas de couleur. Le fond est laissé en blanc, avec des signes en noir indiquant la roche-mère.

Les sols peu évolués n'ont pas reçu de couleur très précise. Ils sont généralement en points gris, pour indiquer qu'une évolution très nette n'est pas discernable. Un début d'évolution est indiqué par une teinte pâle (bleu pâle pour une hydromorphie, vert pâle pour une halomorphie peu accentuées, etc...).

Les sols calcomagnésimorphes ont une teinte jaune (celle qu'on attribue généralement au calcaire). Les vertisols ont une teinte violette; les sols isohumiques et les sols à mull des teintes brunes; les podzols ont une teinte rose, pour indiquer l'importance revêtue par les mouvements du fer. Les sols à sesquioxydes ont des couleurs orangées pour les sols ferrugineux tropicaux, rouges pour les sols méditerranéens et ferrallitiques. Les sols hydromorphes sont représentés par des bleus et les sols halomorphes par des verts.

Les pédologues métropolitains, n'ayant pas les mêmes sols à représenter, ont apporté des modifications sur l'emploi des teintes comme le vert et le rouge. Ils ont

souhaité que le vert soit utilisé pour les alluvions, puisque les sols halomorphes sont relativement peu étendus. De même, le rouge des sols à sesquioxydes risquait de servir assez peu, alors que les podzols et les sols podzoliques sont assez répandus.

Chaque fois que cela est possible, on indique la famille, d'après la nature de la roche-mère. Un certain nombre de signes fondamentaux en grisé ont été retenus, à partir desquels on indique les roches observées. Il n'a pas été jugé utile de préparer un nombre élevé de signes.

13.2. Les caractéristiques et types de cartes pédologiques.

Les différentes cartes pédologiques dépendent de l'objectif poursuivi qui conditionne l'échelle et du degré de précision dans la représentation des unités.

13.2.1. L'échelle est sous la dépendance de la dimension des objets à représenter et la facilité avec laquelle on pourra les limiter; par conséquent, il est important de savoir ce que représente un trait porté sur une carte et une surface de terrain déterminée. On a porté sur le tableau suivant ce que représente, aux diverses échelles, un trait de 0,2 mm tel qu'il résulte du tracé normal d'une limite et une surface de 4 mm² qui est une des plus petites que l'on peut normalement espérer représenter sur une carte. Les utilisateurs peuvent donc déterminer sur ces bases l'échelle de la carte à établir.

Echelle	Largeur sur le terrain d'un trait de 0,2 mm sur la carte	Surface de terrain cor- respondant à 4 mm ² sur la carte
1/10.000	20 m	400 m ²
1/20.000	40 m	1.600 m ²
1/50.000	100 m	1 ha
1/200.000	400 m	16 ha
1/500.000	1.000 m	100 ha
1/1.000.000	2.000 m	400 ha

Tableau N°29

- Relation entre l'échelle et les dimensions d'un trait
et d'une surface.

Un autre aspect important qui intervient dans le choix de l'échelle est la lisibilité de la carte qui permettra son interprétation et son intérêt. Il ne faut pas que les dimensions des surfaces représentées soient trop petites, sans quoi, la compréhension du terrain échappe à l'observateur et le but poursuivi n'est pas atteint. Il va de soi qu'à toute échelle un certain degré d'abstraction est indispensable. Celui-ci est particulièrement important lorsqu'on veut établir une carte à petite échelle à partir d'une autre à grande échelle.

Les utilisateurs français représentés par le GEPPA (Groupe d'Etude des Problèmes de Pédologie Appliquée) ont fixé les échelles dont ils avaient besoin en vue de la mise en valeur d'une région.

- a) Pour la planification régionale, les cartes pédologiques nécessaires doivent avoir une échelle comprise entre 1/200.000 et 1/50.000.
- b) Pour la mise en valeur d'un secteur déterminé, l'évaluation des aptitudes culturales exige une cartographie au 1/20.000 et plus.
- c) Au niveau de la parcelle, il est nécessaire d'atteindre le 1/5.000.

Les pédologues américains procèdent au levé systématique de leurs sols, pour les besoins généraux de l'agriculture à l'échelle du 1/63.360 (1 pouce par mille). Mais, de plus en plus, les besoins créés par des problèmes industriels précis (pose de canalisations diverses telles que gaz, eau, etc.); le développement des zones urbaines (implantation des bâtiments publics, des maisons privées) nécessitent des documents pédologiques à des échelles de l'ordre du 1/20.000.

Dans les zones intertropicale et méditerranéenne, la carte pédologique de base, susceptible de donner, au niveau d'une région naturelle, ou pour toute une portion de pays, les renseignements utiles pour la planification régionale sont établis au 1/200.000; plus rarement, suivant la nature du terrain et les buts recherchés, on pousse jusqu'au 1/50.000. La mise en valeur d'une zone limitée exige des documents à plus grande échelle comme le 1/10.000 (plaine alluviale à assainir et irriguer; plantation à créer, etc.). Lorsque la cartographie est suffisamment avancée dans un pays, on peut tenter une représentation d'ensemble à une échelle assez petite (1/1.000.000 par exemple) afin de donner une idée générale et synthétique de la pédogénèse et de permettre des comparaisons à distance.

13.2.2. Un deuxième problème que l'on relie généralement à celui de l'échelle est la précision de la carte. Dans la grande majorité des cas, les cartes à petite échelle sont

moins précises que les cartes à grande échelle. En effet, ces dernières ont des limites d'une grande précision et les unités pédologiques représentées correspondent à une différenciation très poussée des critères retenus pour les sols. Mais ce n'est pas obligatoire et on peut très bien concevoir des cartes à petite échelle établies d'emblée à la précision voulue ou bien résultant de la réduction de cartes détaillées.

C'est ainsi que l'on connaît un certain nombre de types de cartes qu'on peut qualifier diversement suivant le degré de précision qui a servi à les établir.

13. 2.3. Les cartes pédologiques. a) La carte détaillée nécessite d'avoir au départ des documents cartographiques d'excellente qualité à une échelle plus grande que celle qu'on veut utiliser, des photographies aériennes parfaitement lisibles sur toute leur étendue. Le terrain doit être entièrement accessible et aucune partie notable ne doit être ignorée. Les limites devront être précises et le degré de pureté des unités élevé.⁽¹⁾ Sur cette carte doivent figurer les données fondamentales de la planimétrie, les courbes de niveau et tout repère utile aux utilisateurs.

Les cartes détaillées sont le plus souvent des cartes à grande échelle (1/20.000 et plus).

b) La carte de reconnaissance relève d'une technique assez différente. On peut, à la rigueur, se passer d'un document topographique convenable, à condition de disposer d'une couverture photographique complète qui pourra servir aussi à la préparation d'un fond topographique. La cartographie pédologique s'appuie très étroitement sur la photographie aérienne et permet de ne pas parcourir tout le terrain. Un certain nombre d'itinéraires dont l'espacement est variable (jusqu'à 5 ou 10 km) est nécessaire et on interpole pour les zones non vues. Il est alors indispensable de bien connaître la végétation, la géologie, la géomorphologie pour effectuer une interpolation convenable. Les levés de reconnaissance conviennent le plus souvent aux cartes de moyenne échelle.

c) Carte de reconnaissance détaillée.

Ce type de carte n'est pas spécial en soi. Il s'agit d'une combinaison des deux modes précédents. Sur un territoire déterminé, certaines parties sont occupées par des montagnes, des dunes, etc. dont la valeur agricole est "a priori" faible.

(1) Les pédologues américains estiment que 85 % est nécessaire.

Ces zones pourront ne faire l'objet que de cartographie de reconnaissance, tandis que le reste, de valeur agricole certaine, fera l'objet d'une cartographie détaillée.

d) Cartes de généralisation.

Il arrive que certaines cartes détaillées occupent une surface (sur le papier) telle qu'il paraisse nécessaire d'opérer une condensation afin d'avoir une manipulation plus aisée. On opère une réduction d'échelle qui peut être très variable suivant le format ou le type de renseignements qu'on désire obtenir.

Dans ce cas, la légende sera à base d'associations. Cette légende pourra être aussi complexe que celle des cartes qui ont fait l'objet d'une réduction.

e) Cartes schématiques.

Alors que les cartes précédentes résultent d'une réduction de cartes déjà établies, les cartes schématiques précèdent souvent l'établissement des cartes de base. Elles résultent d'observations faites sur le terrain combinées à une interprétation de toutes les données non pédologiques. La valeur des cartes schématiques est variable, mais leur utilité est grande car elle permet de se faire une idée générale sur un pays et d'évaluer, même sommairement, ses potentialités. Elle permet la mise au point périodique des connaissances sur les sols d'un pays.

Relation entre le type de carte et l'échelle.

Il n'y a pas de relation obligatoire entre un type de carte et une échelle déterminée. Cependant, il est bien évident, en raison de ce qui a été dit plus haut, que les échelles les plus petites ($1/500.000$ à $1/2.000.000$) permettent généralement d'atteindre le sous-groupe. Une bonne connaissance des matériaux originels permet, dans certains cas, de représenter les familles. Très souvent on est amené à présenter des juxtapositions de sous-groupes ou de familles. Il s'agit alors de cartes de généralisation ou de cartes schématiques. La fiabilité est bonne dans le premier cas, beaucoup moins dans le second.

Les cartes de moyenne échelle ($1/200.000$ à $1/50.000$) sont le plus souvent des cartes de reconnaissance. L'unité est généralement la famille pour le $1/200.000$; la série pour le $1/50.000$. Les juxtapositions sont fréquentes. La cartographie qui s'appuie sur des documents topographiques variables mais sur les photographies aériennes

est nettement meilleure que dans le cas précédent. Elle permet de bien dégager les grandes tendances de la pédogénèse et de fixer les unités de sol les plus importantes.

Les cartes de grande échelle (supérieure à 1/20.000) sont établies avec le maximum de rigueur. Le nombre d'observations est très élevé. L'unité de base est la série mais on atteint très souvent la phase.

13.2.4. Les cartes issues de cartes pédologiques.

La carte pédologique est un document de valeur scientifique qui s'appuie sur de nombreuses observations sur le terrain et des déterminations de laboratoire. Elle sert à l'établissement d'autres documents qui intéressent plus particulièrement les utilisateurs et donne lieu à l'élaboration de diverses cartes thématiques. On peut ainsi représenter une ou plusieurs propriétés du sol (texture, pH, teneurs en sels, etc.) dont l'influence est prépondérante pour une utilisation bien déterminée, comme le choix d'un emplacement pour un terrain d'aviation, la pose d'une canalisation, la mise en place d'une culture. Les cartes peuvent servir à l'établissement de carte de drainage, d'assainissement; on peut également représenter des travaux anti-érosifs, etc. Une de ces cartes les plus importantes est la carte d'aptitude culturale. Celle-ci, en fait, ne doit pas être établie par le seul pédologue mais plutôt par une équipe comprenant des spécialistes divers tels qu'agronome, économiste, hydrologue, etc. En tenant compte des facteurs de l'environnement aussi bien que des caractéristiques propres des sols, elles ont pour but de déterminer les cultures qui conviennent le mieux à un sol dans un contexte écologique et économique, d'indiquer les types d'agriculture, de rotation, d'engrais qui apparaissent convenir le mieux. Elles indiquent également les mesures à prendre pour maintenir le niveau de fertilité des sols et, si possible, l'améliorer. Ici encore différentes variantes peuvent être proposées, suivant qu'on met l'accent sur telle ou telle culture ou envisager le cas d'irrigation, etc.

13.3. Etablissement d'une carte pédologique.

L'établissement d'une carte pédologique commence, en fait, bien avant le départ sur le terrain. La première chose est de savoir exactement ce qu'on va faire, dans quel but la prospection a été demandée, quelle est la superficie que l'on va cartographier, et à quelle échelle. Ces renseignements permettent déjà d'orienter le travail et de prévoir à peu près combien de temps il va durer, et combien de personnel et de moyens de travail pour le réaliser.

Ceci connu, il faut procéder au rassemblement des renseignements de tous ordres que l'on possède sur le secteur à étudier.

Les premiers documents sont évidemment les cartes topographiques. Si elles existent à plusieurs échelles, il faut choisir celles dont l'échelle est supérieure à la carte qu'on va dresser. On peut dresser une carte si le document topographique est à une échelle supérieure à la carte qu'on veut obtenir. On ne peut faire l'inverse (c'est-à-dire agrandir un document topographique). On peut à la rigueur, procéder à l'agrandissement photographique d'une photographie aérienne ou d'une carte provenant de photographies.

On procède à l'achat des photographies aériennes et les étudie couple par couple en portant, sous le stéréoscope, les limites physiographiques qui auront pu être décelées. On établit une carte de travail portant des zones qui devront être contrôlées sur le terrain.

On rassemble également toutes les données sur les roches (la carte géologique doit être étudiée de près), le climat (pluies avec leur répartition, température), les rivières, la forme de leur bassin, les populations et leurs activités.

Enfin, on recherche tous les ouvrages, les articles qui ont traité de la région étudiée et on en établit un résumé et une bibliographie sommaire. Il est souvent très utile d'examiner ce qui a été fait et écrit sur les zones avoisinant celle qu'on va étudier. Dans bien des cas, on observe des analogies entre des régions semblables.

Muni de tous ces documents et renseignements, le pédologue est en mesure de commencer sa cartographie. Plusieurs problèmes se présentent alors à lui; localiser le sol, l'identifier, le limiter. Le premier problème relève de la cartographie pure. La solution implique que le pédologue est à même de se situer à chaque instant sur une carte ou sur une photographie aérienne, quelle que soit leur échelle. L'identification du sol se fait d'abord morphologiquement. Les observations faites sur le terrain. (chapitre 5) seront complétées par des déterminations au laboratoire (chapitre 6). Un problème délicat consiste à limiter le sol sur la carte.

En effet, le sol est un milieu à trois dimensions et continu, dont tous les éléments sont généralement cachés à l'observateur par la végétation naturelle ou des activités humaines. On ne peut approcher le sol que de manière discontinue, par sondages, par points. Les longues coupes ouvertes pour les routes ou les voies de chemin

de fer, si précieuses soient-elles, demeurent assez rares. Il est donc impossible de suivre une limite sur le terrain de manière convenable, aussi est-il donc nécessaire d'interpoler. Toute la science du pédologue consistera à placer ces limites où doit être situé le profil.

Il est difficile d'énoncer une règle précise pour cette opération qui est pourtant l'opération fondamentale du pédologue. On peut toutefois donner quelques indications utiles. Un trou pédologique et le profil qui y sera observé, doivent représenter une surface importante du paysage; il ne faut pas que le profil observé puisse être considéré comme un cas particulier. Un profil isolé, quelque soit le soin avec lequel on l'examine, n'a pas de sens en cartographie pédologique (alors qu'on peut concevoir qu'il en a un dans une étude détaillée de pédogénèse). Par conséquent, il faut qu'on puisse le retrouver ailleurs, en exemplaires assez nombreux. Dans ce cas, il est représentatif d'une unité pédologique et sera signalé sur la carte.

13.3.2. Facteurs de formation du sol.

Lorsqu'on examine une certaine superficie, on peut s'attendre à voir un changement de sol dans un certain nombre de cas (et bien entendu, il existe des changements imprévisibles à première vue).

Changements de roche-mère. Chaque fois que l'on change de roche-mère, le profil du sol est modifié. Le changement de roche-mère se traduit par une modification de la granulométrie, de la perméabilité, de l'aération du sol. Un grès et une argile donnent naissance à des sols bien différents. Lorsqu'une roche se présente sous des formes physiques différentes, les sols ont également des propriétés variables. Par exemple, un basalte et des cendres basaltiques donnent naissance à des sols aux caractéristiques différentes (au niveau des séries, car il est bien évident que les deux roches donneront des sols appartenant aux mêmes groupes s'ils sont placés dans les mêmes conditions générales).

Changements de topographie. Un changement de topographie détermine un changement dans le profil, par suite de la pente : une forte pente accélère les processus de lessivage latéral, d'érosion et généralement l'épaisseur du sol est moindre, les roches-mères affleurent parfois. Inversement, une trop faible pente détermine une mauvaise évacuation de l'eau, un mauvais drainage, l'apparition des processus déterminant l'hydromorphie en position de bas-fond. Un plateau rigoureusement plat en pays tropical est souvent le signe de l'existence d'une cuirasse.

Un changement de végétation traduit également un changement de sol. L'apparition d'une masse de raphias dans une zone forestière est souvent l'indice d'un mauvais drainage ou d'un changement de sol. Mais il ne faut pas oublier que le passage de la forêt à la savane n'est pas dû à un changement de sol, mais à une action humaine. Ultérieurement, la dénudation du sol peut entraîner des variations considérables dans l'état du sol par suite de l'érosion.

On voit donc que la connaissance des conditions du milieu, des facteurs de formation du sol, sont essentiels pour aider à la mise en place des limites. Dans la résolution de ce problème, les photographies aériennes apportent une aide tout à fait remarquable. Si elles ne fournissent pas de limites de sols, elles permettent d'avoir une idée assez précise sur le drainage, le relief, la végétation, le mode d'occupation du sol, parfois les roches-mères, etc. et fournissent donc un adjuvant unique dans la mise en place des limites.

13.3.3. Les photographies aériennes et leur utilisation.

Il n'y a pas de véritable doctrine pour l'utilisation des photographies aériennes en pédologie. En effet, la photographie permet de "voir" le relief, le drainage, la végétation, les accidents tectoniques, etc. Mais, lorsque la pluviométrie est suffisante, le sol est presque toujours inaccessible à l'observation aérienne. Il faut alors interpréter les facteurs visibles énoncés précédemment et établir une relation constante et étroite entre les observations faites sur le terrain et sur la photographie.

Tout d'abord, la photographie est un excellent document topographique. Il donne des rivières, des routes, des éléments du relief, etc., des tracés et contours qu'on peut difficilement égaler. Mais il faut se souvenir que l'échelle varie d'une série de photographies à une autre et qu'elle n'est pas rigoureusement la même sur toute l'étendue de la photographie. Des appareils particuliers permettent de procéder à l'élaboration de mosaïques et d'obtenir les éléments de la planimétrie à partir des mosaïques.

Différentes méthodes ont été proposées dans le but d'utiliser la photographie aérienne en pédologie. La méthode des itinéraires consiste à établir une carte détaillée le long des itinéraires qu'on peut faire au cours d'une prospection. On a une bonne idée de la nature et la répartition des sols sur des bandes plus ou moins éloignées et qui se recoupent. La méthode des zones témoins est également préconisée. Le choix de ces zones témoins est effectué après étude des photographies et du terrain. Ces zones, entre

1/10 et 1/20 de la superficie totale, doivent donner une représentation correcte de l'ensemble de la carte. Elles sont étudiées en détail. Dans les deux cas on interpole pour les zones non parcourues en s'appuyant sur la comparaison des photographies aériennes des zones étudiées et non étudiées. Il faut procéder à des contrôles entre les bandes et les zones témoins. Le gain de temps et de précision dans les limites est considérable.

Mais il va de soi que l'examen des photographies seules ne saurait être suffisant et qu'un contrôle rigoureux au sol devra toujours être effectué.

13.3.4. Etablissements des itinéraires, de la densité des trous.

Le nombre de trous à creuser dans une région dépend essentiellement de la nature de la carte que l'on a à dresser, et surtout de son échelle et aussi de la possibilité plus ou moins grande que l'on a d'interpoler.

Cartes à petite échelle 1/500.000 à 1/2.000.000. On suit les principaux pistes et chemins, et effectue une observation tous les 2 à 10 km, suivant les changements que l'on observe dans le paysage, tout en se rappelant qu'on ne peut guère songer représenter des surfaces trop exigües. A l'échelle du 1/1.000.000, 1 km sera représenté par une longueur de 1 mm; par conséquent, toute longueur inférieure est impossible à représenter.

Cartes à moyenne échelle 1/50.000 à 1/200.000. Ce sont ces cartes qu'on est amené à lever le plus souvent. Dans ce cas, au 1/50.000, 1 mm sur la carte représente 50 m. sur le terrain. Au 1/200.000, 1 mm sur la carte représente 200 m sur le terrain. Les trous, dans ce cas, devront être beaucoup plus rapprochés.

Cartes à grande échelle 1/5.000 à 1/25.000. Dans la carte au 1/5.000, 1 mm sur la carte représente 5 m sur le terrain; 1/25.000, 1 mm sur la carte représente 25 m sur le terrain. Les cartes à grande échelle sont généralement dressées dans les plaines. Pour les très grandes échelles, il est souvent difficile de choisir les emplacements des trous. Dans ce cas, il faut procéder à un quadrillage géométrique permettant de couvrir toute la surface sans rien laisser dans l'ombre.

MAIGNIEN (1967) a indiqué, dans le tableau suivant, les relations entre l'échelle et la précision qu'on obtient suivant le nombre d'observations par centimètre carré de carte.

Echelle de la carte	Surface représentée par cm ² de carte	Nombre d'observations nécessaire sur le terrain suivant le nombre de points par cm ² de carte		
		9	4	2
1/10.000	1 ha	900	400	200
1/20.000	4 ha	225	100	50
1/50.000	25 ha	36	16	8
1/200.000	4 Km ²	2	0,8	0,5
1/500.000	25 Km ²	0,35	0,15	0,1
1/1.000.000	100 Km ²	0,1	0,05	0,03

Tableau N° 30

- Relation entre l'échelle, la superficie représentée par 1 cm² de carte et le nombre de trous par cm² de carte.

13.4. UTILITES DE LA CARTE PEDOLOGIQUE.

La carte pédologique répond à deux types fondamentaux d'ambitions :

Analyse : présenter une description aussi détaillée que possible des différents éléments constituant les sols et le paysage.

Prévision : prévoir ce qui pourra être fait de ces sols en fonction des données locales.

La description et la présentation des sols est donnée par la carte pédologique proprement dite. Cette donnée, bien faite, doit être fixe.

La carte d'utilisation rend compte des prévisions. Ces prévisions sont variables car elles dépendent de la nature des sols, des populations, de l'infrastructure économique et de l'état des marchés.

13.4.1. Buts analytiques.

- Déterminer les caractéristiques importantes des sols;
- les classer et en dresser l'inventaire;
- établir et porter la limite sur les cartes des types reconnus,
- prévoir les types d'utilisation possibles sous différents modes de cultures.

13.4.2. Buts généraux des cartes d'utilisation.

1 - Choix des emplacements des fermes expérimentales et stations de recherche :

Pour qu'une recherche agronomique puisse donner des résultats valables, il faut savoir à quels sols s'appliquent les résultats obtenus, quelle est l'étendue à laquelle les résultats obtenus peuvent s'appliquer.

2 - Installations d'exploitations agricoles rationnelles en indiquant : les grands types d'utilisation, les rotations, les méthodes de labour, les engrais et amendements, les systèmes antiérosifs, etc.

3 - Etude du drainage et de l'irrigation. Il est nécessaire de bien connaître les qualités des sols à drainer avant d'effectuer le drainage, certaines régions irriguées ont été affectées par des remontées de sels. Une bonne connaissance du sol (épaisseur des horizons, nature des horizons profonds, texture, etc.) permet d'éviter certaines erreurs.

4 - Etude des sols en vue de leur achat par des organismes d'Etat pour l'aménagement des centres urbains.

5 - La cartographie des sols a de plus en plus d'usage pour les eaux et forêts et pour l'installation des routes, des tuyaux, pipe-lines, câbles télégraphiques, etc.

6 - Connaissances scientifiques enfin : chaque carte pédologique est une pierre à la connaissance générale des sols et contribue à une meilleure interprétation des phénomènes qui sont à l'origine de la formation des sols.

Guide dans le peuplement des nouvelles terres.

Pendant des siècles, le peuplement de nouvelles terres est une succession de succès et d'erreurs d'où un gaspillage d'énergie et d'années. Dans la zone tropicale, existent de grandes étendues de sols peu connus et jamais utilisés par l'homme équipé des outils et des services de l'industrie moderne.

Il est nécessaire d'établir des corrélations avec des pays déjà connus et utiliser les résultats obtenus ailleurs, même si les sols ne sont pas tout à fait identiques.

Dans un pays neuf, le meilleur procédé est le suivant :

- faire une carte de reconnaissance ou schématique, de manière à identifier les meilleurs endroits pour les établissements,
- faire ensuite la cartographie détaillée dans différents endroits d'après des ordres d'urgence.

13.5 Coût d'une carte pédologique

1 3.5.1. Considérations générales.

Il est difficile de donner un devis type de carte pédologique car plusieurs facteurs importants interviennent qui influent très fortement sur le prix de revient : en particulier, la situation du pays dans lequel on va travailler et la nature du terrain lui-même.

- a) La situation du pays intervient dans le coût des services (salaires de la main d'œuvre et des techniciens que l'on peut recruter sur place), dans le coût des produits nécessaires à l'exécution des travaux (produits chimiques, lubrifiants, essence, etc.).
- b) L'éloignement du pays par rapport au pays d'origine des chercheurs et techniciens influera également sur les salaires et accessoires à leur verser, sur le prix des transports, etc.
- c) La nature du terrain interviendra également très fortement. Une forte densité des routes et des pistes sera un facteur favorable à une circulation aisée. Un relief tourmenté, un marais, une zone peu peuplée seront, par contre, des causes de ralentissement dans la prospection.

Il faudra donc tenir compte de ces facteurs de variation et naturellement le devis s'en ressentira. Toutefois, un certain nombre de données est identique pour toutes les cartes qui comportent toutes les étapes suivantes :

- Avant la prospection : travail en salle pour étudier les documents existants, rapports et cartes antérieurs ; documents sur la géologie, la végétation, les populations ; étude des photographies aériennes, avec délimitation de zones homogènes et repérage des itinéraires éventuels.
- La prospection elle-même : mise en place des trous pédologiques suivant les itinéraires choisis ou bien quadrillage du terrain (suivant l'échelle) ; prélèvement des échantillons ; relevé des profils ; établissement d'une carte provisoire.

- Après la prospection :

- analyse des échantillons : deux types peuvent être envisagés, déterminations effectuées systématiquement sur tous les échantillons et analyses spéciales commandées par les observations faites sur le terrain (sels, minéraux argileux, etc.) ;
- mise au net et impression de la carte : la minute est effectuée par le pédologue lui-même et transmise à un atelier de cartographie pour mise au point d'une maquette définitive et sélection de couleurs ; l'impression de cartes en couleurs doit être faite par une entreprise spécialisée dans ce genre de travail ;
- rédaction d'une notice explicative donnant tous les renseignements utiles sur la région prospectée, sur les sols, leurs propriétés, répartition et superficie : dans cette notice, figurent également les renseignements concernant les aptitudes présentées par ces sols pour leur mise en valeur.

1 3.5.2. Etablissement du devis.

L'organisme qui est appelé à effectuer les travaux pédologiques établit un devis, pour chaque prospection, qui tient compte des données précédentes et également de l'échelle de la carte et de sa superficie.

Ce devis comprend les deux parties essentielles suivantes, salaires et frais matériels.

A. Salaires.

Personnel expatrié. Il s'agit du pédologue chargé de l'opération ; il peut ou non être assisté d'un technicien (prospecteur). Le salaire tient compte du grade, du prix des voyages, etc. Un contrôle scientifique doit toujours être assuré. Il y a donc lieu de prévoir la venue d'un pédologue ancien pendant un temps qui dépendra de l'importance du travail.

Personnel local. Le personnel local est recruté sur place (technique ou main d'oeuvre) pour la durée de l'opération. Les sommes payées sont calculées

d'après les barèmes et les réglementations en vigueur dans le pays où l'on travaille. Il faut tenir compte des frais de déplacement lorsque le personnel quitte la base.

B. Frais matériels.

Véhicules. Amortissement, entretien, réparations ; outillages divers, matériels de prospection, de campement, cartes, papiers, etc.

Analyses des échantillons. Transport au laboratoire ; analyses proprement dites dont le détail peut varier pour chaque opération.

Edition. Préparation et impression de la carte ; rédaction et impression de la notice.

A tous ces frais, il est bon de tenir compte de frais généraux de gestion pour les organismes qui effectuent les travaux.

On peut compter que les frais afférant à l'établissement d'une carte pédologique s'élèveront aux chiffres approximatifs suivants :

Prix à l'ha (suivant le pays)

1/200.000	0,2 à 0,6
1/ 50.000	6 à 15
1/ 20.000	20 à 30

13.5. Bibliographie

- Anonyme.- Soil classification. A comprehensive system. 7th approximation. Soil Survey Staff Soil Conserv. Ser. U.S.D.A. 265 p.
- AUBERT (G.) - 1947.- Les sols à croûte calcaire. C.R. Conf. Pedol. Medit. Alger-Montpellier. 330-332.
- AUBERT (G.) - 1954.- Les sols latéritiques. C.R. 5e Cong. Internat. Sc. Sol. Léopoldville.
- AUBERT (G.) - 1963.- Soils with ferruginous or ferrallitic crusts of tropical regions. Soil Sc., 95, 4, 235-242.
- AUBERT (G.), DUCHAUFOR (Ph.) - 1956.- Projet de classification des sols. VIe Cong. Intern. Sc. Sol. Paris, V 97, E, 597-604.
- AUBERT (G.), FOURNIER (F.) - 1955.- Les cartes d'utilisation des sols. Sols africains. III, 1, 96-109.
- AUBERT (G.), SEGALEN (P.) - 1966.- Projet de classification des sols ferrallitiques. Cah. ORSTOM. Ser. Pedol., IV, 4, 97-112.
- BOCQUIER (G.) - 1964.- Présence et caractère de solonetz solodisés dans le bassin tchadien. 8e Cong. Internat. Sc. Sol. Bucarest., VI, 381-384.
- BONTE (A.) - 1945.- Introduction à la lecture des cartes géologiques. Masson, Paris, 223 p.
- BOTELHO DA COSTA (J.V.) - 1959.- Ferrallitic, tropical fersiallitic and tropical semi-arid soils. 3e Conf. Interafr. des Sols. Doc. 91.
- BOTELHO DA COSTA (J.V.), AZEVEDO (A.L.) - 1960.- Generalized soil map of Angola. Trans. 7th Internat. Congr. Soil Sc., Madison, IV, 56-62.
- BOTTENER (P.), LOSSAINT (P.) - 1967.- Etat de nos connaissances sur les sols rouges du Bassin méditerranéen. Sc. Sol., I, 49-80.
- BOULAIN (J.) - 1957.- Etude des sols des plaines du Chélif. S.E.S. Alger, 582 p. (thèse Sc.).
- BUCHANAN (F.) - 1807.- A journey from Malabar through the countries of Mysore, Canara and Malabar. Vol 2, p. 436-460. London, East Indian Company.

- CUMMINS (A.B.), KELLEY (W.P.) - 1923.- The formation of sodium carbonate in soils. .
Calif. Agric. Exp. Sta. Techn. Pap. n° 7.
- DHOORE (J.) - 1954.- L'accumulation des sesquioxides libres dans les sols tropicaux.
Pub. INEAC 62. 132 p.
- DUCHAUFOR (Ph.) - 1967.- La podzolisation en climat atlantique. Ann. Edafol. Agrobiol.
(Madrid), XXVI, 1-4, 241-258.
- DUCHAUFOR (Ph.) - 1965.- Précis de pédologie. 2e Ed. Masson, Paris, 481 p. .
- DUCHAUFOR (Ph.) - 1961.- Données nouvelles sur la classification des sols. Ann. Ec.
Nat. Eaux et Forêts et Stat. Rech. Exp. XVIII, 4, 9-67.
- DUCHAUFOR (Ph.), DOMMERGUES (Y.) - 1963.- Etude des composés humiques de quelques sols
tropicaux et subtropicaux. Sols africains., 8, 1, .
- DUDAL (R.), BRAMAO (L.) - 1967.- Sols argileux foncés des régions tropicales et subtro-
picales. F.A.O. Rome Coll. Progrès et mise en valeur. Agriculture n° 83, 172 p.
- DURAND (J.H.) - 1963.- Les croûtes calcaires et gypseuses en Algérie. Formation et âge.
Bull. Soc. Geol. France V, 959-968.
- GAUCHER (G.) - 1948.- Sur quelques conditions de formation des croûtes calcaires. C.R.
Ac. Sc. 227, 215-217.
- GEDROIZ (R.R.) - 1912.- Colloidal chemistry as related to soil science. I. Colloidal
substances in the soil solution. Formation of sodium carbonate in the soil. Alkali
soils and saline soils. Zhur. Opit. Agron., 13; 363-412.
- GERASIMOV (I.P.), GLAZOVSKAYA (M.A.) - 1965.- Fundamentals of soil science and soil geo-
graphy. Israël program for scientific translation. Jerusalem. 382 p.
- GILE (L.H.), PETERSON (F.F.), GROSMAN (R.B.) - 1966. - Morphological and genetic sequences
of carbonate accumulation in desert soils. Soil.Sc. 101, 5, 347-360.
- HERBILLON (A.), GASTUCHE (M.C.) - 1962.- Etude des gels d'alumine ; cristallisation en
milieu désionisé, Bull. Soc. Chim. France 7, 1404-1412.
- IARKOV (S.P.) - 1956.- Dynamique saisonnière de certains processus dans les sols. VIe
Cong. Internat. Sc. du Sol, Paris. V, 66, E, 401-405.

- IVANOVA (E.N.), REZOV (N.N.) - 1960.- Classification of soils and the soil map of the U.S.S.R. - Transac. 7th Intern. Cong. Soil Sc. Madison Wisc. IV, 77-87.
- KELLEY (W.P.) - 1951.- Alkali soils, their formation, properties, and reclamation. Rheinbald publ. New York. 176 p.
- KELLOGG (C.E.), DAVOL (F.D.) - 1949.- An exploratory study of soil groups in the Belgian Congo. Pub. INEAC Ser. Sci. 46, 73 p.
- KOVDA (V.A.) - 1965.- Alkaline soda - saline soils. Agrokenia es Talajtan. Proc. Symposium on sodic soils. Budapest, t 14, 15-48.
- KOVDA (V.A.) - 1965.- Common features and differences in the history of the soils of the continents. Soviet Soil Sci. 1, 1-11.
- KUBIENA (W.L.) - 1953.- The soils of Europe. Madrid.
- LACROIX (A.) - 1923.- Minéralogie de Madagascar. 3 Vol. Soc. Ed. Geogr. Marit. Colon. Paris. Vol.3, p. 91 à 136.
- LAOUROUX (M.) - 1965.- Observations sur l'altération des roches calcaires sous climat méditerranéen humide. Cah. ORSTOM. Ser. Pedol. III, 1, 21-42.
- MAIGNIEN (R.) - 1958.- Le cuirassement des sols en Guinée. Mem. Serv. Carte Geol. Als-Lor. 16, 239 p.
- MAIGNIEN (R.) - 1966.- Compte-rendu de recherche sur les latérites. UNESCO. 155 p.
- MAIGNIEN (R.) - 1967.- Manuel de prospection pédologique. 2 Vol., 199 p. Mineog. Centre ORSTOM Yaoundé.
- MARBUT (C.F.) - 1928.- A schema for soil classification. First Intern. Cong. Soil Sci. Washington IV, 1-31.
- MARTIN (D.), SIEFFERMANN (G.), VALLERIE (M.) - 1966.- Les sols rouges du Nord-Cameroun. Cahiers ORSTOM, Ser. Pedol IV, 3, 3-28.
- MILLOT (G.) - 1964.- La géologie des argiles. Masson, Paris, 499 p.
- MONDESIR (P. de) - 1888.- Sur le rôle du pouvoir des terres dans la formation des carbonates de soude naturels. C.R. Ac. Sc. 160, 459-462.
- MCHER (E.C.J.), VAN BAREN (F.A.) - 1954.- Tropical soils. Interscience publishers. London, New York, 498 p.

- PEDRO (G.) - 1966.- Essai sur la caractérisation géochimique des différents processus zonaux résultant de l'altération des roches superficielles (cycle aluminosilicique). C.R. Ac. Sc. 262, 1828-1831.
- PRESCOTT (J.A.), PENDLETON (R.L.) - 1952.- Laterite and lateritic soils. Commonwealth bur. Soil Science Techn. Comm. 47, 45 p.
- REIFENBERG (A.) - 1935. - Soil formation in the mediterranean. 3e Conf. Intern. Sc. du Sol 6, 306-309.
- RODE (A.A.) - 1962.- Soil Science. Israël program for scientific translations Jerusalem. 517 p.
- RUELLAN (A.) - 1966.- Sols isohumiques et accumulations du calcaire en basse Moulouya et dans l'ensemble du Maroc. Description, pédogénèse et classification. Document ronéotypé communiqué par l'A. 167 p.
- SEGALEN (P.) - 1964.- Le Fer dans les sols. Publ. ORSTOM. Init. Doc. Tech. n° 4, 150 p.
- SEGALEN (P.) - 1965.- Les Produits alumineux dans les sols de la zone tropicale humide. Cah. ORSTOM sér. Pedol. III, 2, 149-176, III, 3, 179-206.
- SMIRNOVA (K.M.), GLEBOVA (G.I.) - 1958.- Content of mobile compounds in podzolic soils of the moscow region. Sov. Soil Sc. 857-862.
- SMITH (G.) - 1965.- Lectures on soil classification. Pédologie 4, 135 p.
- Soil Survey Staff. U.S.D.A. - 1951.- Soil survey manual. U.S. Dept. Agric., Washington Dc. 503 p.
- STEPHENS (C.G.) - 1953.- Soil surveys for land development. F.A.O. agricultural Studies n° 21.
- SYS (C.), en collaboration avec VAN WAMBECKE (A.), FRANKART (R.), GILSON (P.), JONGEN(P.), BERCE (J.M.), JAMAGNE (M.) - 1960.- La cartographie des sols au Congo et au Ruanda-Urundi, ses principes et ses méthodes. Publ. INEAC, Bruxelles, n° 63.
- SYS (C.) - 1960.- Principles of soil classification in the Belgian Congo. Transac. 7th Internat. Congr. Soil Sc., Madison, IV, 112-118.
- THOMANN (Ch.) - 1964.- Les différentes fractions humiques de quelques sols tropicaux de l'Ouest africain. Cah. ORSTOM, ser. Pedol. II, 3, 73-79.

- IVANOVA (E.N.), REZOV (N.N.) - 1960.- Classification of soils and the soil map of the U.S.S.R. - Transac. 7th Intern. Cong. Soil Sc. Madison Wisc. IV, 77-87.
- KELLEY (W.P.) - 1951.- Alkali soils, their formation, properties, and reclamation. Rheinbald publ. New York. 176 p.
- KELLOGG (C.E.), DAVOL (F.D.) - 1949.- An exploratory study of soil groups in the Belgian Congo. Pub. INEAC Ser. Sci. 46, 73 p.
- KOVDA (V.A.) - 1965.- Alkaline soda - saline soils. Agrokhenia es Talajtan. Proc. Symposium on sodic soils. Budapest, t 14, 15-48.
- KOVDA (V.A.) - 1965.- Common features and differences in the history of the soils of the continents. Soviet Soil Sci. 1, 1-11.
- KUBIENA (W.L.) - 1953.- The soils of Europe. Madrid.
- LACROIX (A.) - 1923.- Minéralogie de Madagascar. 3 Vol. Soc. Ed. Geogr. Marit. Colon. Paris. Vol.3, p. 91 à 136.
- LAMOUROUX (M.) - 1965.- Observations sur l'altération des roches calcaires sous climat méditerranéen humide. Cah. ORSTOM. Ser. Pedol. III, 1, 21-42.
- MAIGNIEN (R.) - 1958.- Le cuirassement des sols en Guinée. Mem. Serv. Carte Geol. Als-Lor. 16, 239 p.
- MAIGNIEN (R.) - 1966.- Compte-rendu de recherche sur les latérites. UNESCO. 155 p.
- MAIGNIEN (R.) - 1967.- Manuel de prospection pédologique. 2 Vol., 199 p. Mineog. Centre ORSTOM Yaoundé.
- MARBUT (C.F.) - 1928.- A schema for soil classification. First Intern. Cong. Soil Sci. Washington IV, 1-31.
- MARTIN (D.), SIEFFERMANN (G.), VALLERIE (M.) - 1966.- Les sols rouges du Nord-Cameroun. Cahiers ORSTOM, Ser. Pedol IV, 3, 3-28.
- MILLOT (G.) - 1964.- La géologie des argiles. Masson, Paris, 499 p.
- MONDESIR (P. de) - 1888.- Sur le rôle du pouvoir des terres dans la formation des carbonates de soude naturels. C.R. Ac. Sc. 160, 459-462.
- MCHER (E.C.J.), VAN BAREN (F.A.) - 1954.- Tropical soils. Interscience publishers. London, New York, 498 p.

- PEDRO (G.) - 1966.- Essai sur la caractérisation géochimique des différents processus zonaux résultant de l'altération des roches superficielles (cycle aluminosilicique). C.R. Ac. Sc. 262, 1828-1831.
- PRESCOTT (J.A.), PENDLETON (R.L.) - 1952.- Laterite and lateritic soils. Commonwealth bur. Soil Science Techn. Comm. 47, 45 p.
- REIFENBERG (A.) - 1935. - Soil formation in the mediterranean. 3e Conf. Intern. Sc. du Sol 6, 306-309.
- RODE (A.A.) - 1962.- Soil Science. Israël program for scientific translations Jerusalem. 517 p.
- RUELLAN (A.) - 1966.- Sols isohumiques et accumulations du calcaire en basse Moulouya et dans l'ensemble du Maroc. Description, pédogénèse et classification. Document ronéotypé communiqué par l'A. 167 p.
- SEGALEN (P.) - 1964.- Le Fer dans les sols. Publ. ORSTOM. Init. Doc. Tech. n° 4, 150 p.
- SEGALEN (P.) - 1965.- Les Produits alumineux dans les sols de la zone tropicale humide. Cah. ORSTOM sér. Pedol. III, 2, 149-176, III, 3, 179-206.
- SMIRNOVA (K.M.), GLEBOVA.(G.I.) - 1958.- Content of mobile compounds in podzolic soils of the moscow region. Sov. Soil Sc. 857-862.
- SMITH.(G.) - 1965.- Lectures on soil classification. Pédologie 4, 135 p.
- Soil Survey Staff. U.S.D.A. - 1951.- Soil survey manual. U.S. Dept. Agric., Washington Dc. 503 p.
- STEPHENS (C.G.) - 1953.- Soil surveys for land development. F.A.O. agricultural Studies n° 21.
- SYS (C.), en collaboration avec VAN WAMBECKE (A.), FRANKART (R.), GILSON (P.), JONGEN(P.), BERCE (J.M.), JAMAGNE (M.) - 1960.- La cartographie des sols au Congo et au Ruanda-Urundi, ses principes et ses méthodes. Publ. INEAC, Bruxelles, n° 63.
- SYS (C.) - 1960.- Principles of soil classification in the Belgian Congo. Transac. 7th Internat. Congr. Soil Sc., Madison, IV, 112-118.
- THOMANN (Ch.) - 1964.- Les différentes fractions humiques de quelques sols tropicaux de l'Ouest africain. Cah. ORSTOM, ser. Pedol. II, 3, 73-79.

- VEENENBOS (J.S.) - 1956.- Méthode et coût d'une étude de la classification des terres et sols par emploi de la photographie aérienne. Sols africains IV, 2, 123-135.
- VILENSKII (D.G.) - 1963;- Soil Science. 3e Ed. Traduct. Israël program. Scientific Translation. Jerusalem. 488 p.
- VINCK (A.) - 1963.- Aspects de pédologie appliquée. A la Baconnière - Neufchatel, 174 p.
- WILBERT (J.) - 1962.- Croûtes et encroûtements calcaires au Maroc. Al Awania 3, 115-192.
- WILLS (J.B.) ed. - 1962.- Agriculture and land use in Ghana. Ghana ministry of Food and Agriculture. Oxford University Press. 504 p. Chap. 6. Soils par H. Frummer.

L'APPLICATION DE LA PEDOLOGIE AU DEVELOPPEMENT

DE L'AGRICULTURE EN AFRIQUE TROPICALE

INTRODUCTION

A - Objectifs et méthodes de la pédologie appliquée

L'application de la pédologie au développement de l'agriculture tropicale est l'une des questions qui suscitent les avis les plus divergents. Si tout le monde est bien d'accord pour reconnaître l'importance d'une bonne connaissance du sol, support physique de la production, il faut noter que les ingénieurs chargés des études et des actions de développement agricole ont éprouvé parfois de sérieuses difficultés pour dégager des études pédologiques les éléments dont ils avaient besoin pour leurs travaux. Il est également arrivé que des études pédologiques aient été mal utilisées, la majeure partie des considérations théoriques des rapports étant négligées pour ne retenir que les conseils pratiques d'utilisation des sols lorsque cet aspect du problème était suffisamment développé.

Il semble que ces difficultés proviennent d'une méprise sur les objectifs et les méthodes des sciences fondamentales et de leur technologie encore appelée science appliquée. Bien que celle-ci procède de celles-là et que les limites de leurs domaines respectifs soient imprécises, leurs buts et leurs principes restent très différents.

Le scientifique est à juste titre préoccupé de faire progresser les connaissances dans la spécialité à laquelle il s'est consacré ; ce souci joint à la nécessité de transmettre par l'enseignement, les théories qu'il a contribué à perfectionner, font que le scientifique n'a qu'un temps limité pour participer à la mise en pratique de ses travaux. De plus le scientifique risque d'éprouver quelque peine à se plier aux nombreuses contraintes qui régissent toute réalisation matérielle, spécialement dans le domaine économique ; en effet la poursuite active d'un résultat tangible peut être difficile à concilier avec la rigueur et l'objectivité des méthodes des sciences fondamentales.

L'ingénieur spécialisé dans une technologie déterminée utilise les connaissances que lui a fournies le scientifique, pour proposer, sous une forme obligatoirement simple, des solutions concrètes et efficaces aux problèmes qui lui sont posés. Il doit appliquer des méthodes mises au point par les scientifiques, en les adaptant aux objectifs qui lui ont été fixés ainsi qu'aux moyens et aux délais qui lui ont été alloués. Cette adaptation constante est la loi essentielle de son activité qui consiste, en définitive, à tirer d'une ou plusieurs sciences les éléments du progrès matériel. L'ingénieur participe également au développement scientifique en démontrant la nécessité de nouveaux thèmes de recherche lorsque les connaissances acquises s'avèrent insuffisantes pour résoudre les problèmes qu'il rencontre.

Tout en étant complémentaires l'activité du scientifique et celle de l'ingénieur spécialisé doivent donc être considérées comme nettement différentes. La distinction qui existe entre la génétique et la sélection végétale ou animale par exemple, n'est cependant pas toujours faite pour les études pédologiques qui parfois tiennent simultanément de la recherche fondamentale et de la technologie en faisant généralement prévaloir les aspects théoriques au détriment des recommandations pratiques.

Cette dualité résulte du fait que les études de pédologie appliquée sont souvent réalisées par des scientifiques et non par des ingénieurs spécialisés dans la mise en oeuvre des théories de cette discipline. Le développement récent de la pédologie a été nettement plus rapide que celui de sa technologie. Les théories pédologiques sont profondément modifiées tout en devenant perpétuellement plus complexes ; leur mise en oeuvre ne peut plus relever d'agronomes non spécialisés dont la formation de base en ce domaine est forcément limitée compte tenu des multiples autres disciplines fondamentales auxquelles ils doivent être initiés. Or les ingénieurs spécialisés en pédologie appliquée sont trop peu nombreux ; ils ne peuvent répondre à tous les besoins et faire ainsi véritablement la liaison entre la science pédologique et l'agronomie.

Les chapitres suivants cherchent à combler cette lacune en proposant des objectifs et des méthodes à la pédologie appliquée. Ce premier essai ne doit évidemment pas être tenu pour définitif. La synthèse des travaux qu'il pourrait inspirer permettra d'élaborer des techniques plus précises pour l'application de la pédologie au développement de la production agricole et d'aider à la spécialisation des ingénieurs dans ce domaine. Cette spécialisation demandera plusieurs années de formation théorique et pratique en zone tropicale en étroite collaboration avec les spécialistes de la science du sol, les agronomes et tous les ingénieurs chargés du développement agricole. Elle sera donc longue et il serait souhaitable de l'organiser soigneusement de façon à disposer d'ingénieurs qualifiés en nombre suffisant.

Faute de terme consacré par l'usage, l'ingénieur spécialisé en pédologie appliquée a été appelé ici, par souci de concision, pédologue. Malgré l'homonymie, il ne doit pas être confondu avec le spécialiste des sciences pédologiques, qui se définit comme n'étant ni un ingénieur, ni un technicien, ni un enquêteur mais un scientifique spécialisé dans l'analyse d'une des données de base du milieu physique.

B - Nécessité du travail en équipe pour les études
et opérations de développement agricole :

Le développement de l'agriculture nécessite une action concertée sur les facteurs physiques, humains et économiques qui ont une influence sur la production. Ces interventions relèvent de diverses techniques. Le responsable d'une étude ou d'une opération de développement agricole doit donc souvent faire appel au concours de plusieurs spécialistes de disciplines variées ; agronomie, zootechnie, génie rural, aménagement forestier, pédologie, hydrologie, économie, sociologie, technologie, etc... Il oriente d'abord les travaux de ces spécialistes en fonction des objectifs assignés aux études, des moyens et du temps disponibles. Par la suite il confronte les informations recueillies afin de définir, en étroite collaboration avec tous ces spécialistes, les problèmes posés par le développement agricole et les solutions qui peuvent être retenues.

Ce responsable apparaît ainsi comme l'animateur et le coordinateur d'une équipe dont les membres doivent :

- rechercher, chacun dans leur domaine particulier, toutes les informations nécessaires,
- présenter ces renseignements et les interpréter sous une forme aisément compréhensible par des personnes étrangères à leur spécialité, afin de permettre une confrontation générale,
- travailler en étroite collaboration de telle sorte que tous les aspects des problèmes aient été envisagés par chacun en ce qui le concerne.

Il ne peut exister de travail profitable en dehors d'une équipe dont tous les membres, si diverse que soit leur formation originelle, sont animés par un même esprit et axés sur un même objectif. Une coordination a posteriori de travaux isolés serait presque impossible et ne pourra jamais avoir l'efficacité d'une synthèse collective d'éléments rassemblés avec une commune préoccupation.

C - Rôle du pédologue au sein de l'équipe

Le rôle du pédologue est particulièrement important. La pédologie, en effet, est l'un des aspects fondamentaux de toute étude ou opération de développement agricole, puisque le choix des cultures, de leur implantation et des techniques agricoles sont en grande partie déterminés par les caractéristiques physiques et chimiques des sols ainsi que par leur localisation.

Il est possible de distinguer cinq grandes catégories de problèmes qui peuvent être posés au pédologue :

- détermination des caractéristiques et localisation des unités de sols
- détermination des cultures et des rendements possibles sur un sol donné, avec des techniques culturales définies (potentiel de production d'un sol)
- choix de sols convenant à une culture donnée, en fonction de techniques culturales définies
- détermination des techniques culturales à employer sur un sol donné pour une culture définie
- détermination des conséquences prévisibles d'une technique culturale donnée sur un sol défini.

Le premier problème est naturellement du ressort exclusif du pédologue. Les autres nécessitent une confrontation des propositions du pédologue et de celles des autres spécialistes afin que ne soit négligée aucune interaction possible entre les facteurs physiques, humains, techniques et économiques.

Chacun de ces problèmes de sols doit être abordé différemment selon la nature et les moyens de l'intervention afin d'aboutir à des résultats qui puissent être comparés à ceux des travaux des autres spécialités et pour répondre strictement aux besoins.

La mission d'un pédologue, au sein d'une équipe chargée d'une étude ou d'une opération de développement, sera donc toujours nettement définie. Il appartiendra à ce spécialiste de choisir ses méthodes de travail en fonction de la nature des problèmes et des moyens disponibles.

Les différents cas d'intervention nécessitant la collaboration d'un pédologue peuvent être classés ainsi :

- étude d'un plan de développement agricole :
 - plan national
 - plan régional
- étude de projets de mise en valeur agricole :
 - amélioration de techniques culturales sans modification de l'implantation des cultures
 - aménagements hydro-agricoles (irrigation, drainage, lutte contre l'érosion)
 - modification de l'implantation des cultures
 - introduction d'une culture nouvelle
 - développement d'une culture
 - augmentation du rendement d'une culture
 - création d'un périmètre de colonisation
- contrôle de l'évolution des sols au cours d'une opération de développement.

C h a p i t r e 14

LA PEDOLOGIE DANS L'ETUDE D'UN PLAN DE DEVELOPPEMENT AGRICOLE

14.1. Définition et processus d'étude d'un plan de développement.

14.2. Plan national de développement agricole.

14.3. Plan régional de développement agricole.

14.1. Définition et processus d'étude d'un plan de développement

Un plan de développement définit des objectifs généraux de production ou de niveau de vie, ainsi que les méthodes et les moyens appropriés pour atteindre ces objectifs.

Les perspectives de développement ne visent qu'à dégager des orientations générales à plus ou moins long terme (10 ans et plus) qui constitueront le cadre d'interventions progressives (projets d'aménagement) devant permettre une mise en valeur harmonisée.

Les plans proprement dits sont généralement à moyen terme (3 à 5 ans). Ils correspondent à des phases d'application des perspectives de développement ou, à défaut de celles-ci, en constituent une phase d'approche.

L'étude d'un plan de développement agricole comporte les étapes suivantes :

- inventaire du potentiel actuel de production et des ressources disponibles en les décomposant en leurs éléments constitutifs physiques, humains, économiques.
- analyse de la situation économique présente montrant l'évolution qui s'est produite antérieurement et celle qui est prévisible dans l'hypothèse où aucune intervention particulière ne serait entreprise. Cette analyse permettra de déceler les facteurs favorables ou défavorables au développement, de comprendre la dynamique des systèmes actuels de production et d'évaluer la nature, les causes ainsi que l'importance et l'urgence des problèmes à résoudre.
- définition d'objectifs et de méthodes de production
- choix des méthodes d'intervention et évaluation des moyens qu'elles impliquent pour atteindre les objectifs de production
- détermination du calendrier des interventions

- vérification de la cohérence des interventions préconisées par analyse de la situation prévisible sur les plans physique , humain et économique.

Cette étude doit être menée dans un temps limité et avec des moyens financiers souvent réduits. Il faudra donc, lors de la collecte des informations de base s'affranchir du souci de détail dont on n'aura à se préoccuper qu'au cours de l'élaboration ultérieure de programmes d'action agricole et de projets d'exécution.

14.2. Plan national de développement agricole

Ces plans couvrent la totalité du territoire national c'est-à-dire, en général des centaines de milliers de kilomètres carrés.

L'élaboration du plan national fait rarement appel à des études particulières sur le terrain; elle est fondée essentiellement sur la documentation existante.

Il sera fait appel à un consultant pédologue expérimenté connaissant très bien le pays et dont les avis porteront notamment sur les points suivants :

- synthèse des connaissances acquises sur place
- synthèse des résultats obtenus à l'étranger et pouvant être utilisés par le plan national
- contraintes générales d'ordre pédologique
- vocations pédologiques
- détermination des emplacements des stations de recherches à créer
- définition des études pédologiques prioritaires et orientation des recherches utiles à la pédologie appliquée.

14.3. Plan régional de développement agricole

Ces plans concernent généralement des surfaces de l'ordre de la dizaine de milliers de kilomètres carrés.

14.3.1. Les études des enquêtes préalables

14.3.1.1. Les informations de base

Le nombre d'informations qu'il serait possible d'utiliser pour dresser l'inventaire du potentiel de production et analyser l'évolution de la situation économique est très grand. Mais leur collecte demanderait des délais très longs et des crédits considérables.

On se limite donc aux seuls points dont l'expérience a montré qu'ils caractérisent bien la situation régionale et son évolution, en se bornant à établir pour l'ensemble de la région, des valeurs moyennes et leur dispersion. Il n'est donc pas tenu compte de situations individuelles ou temporaires qui ne sont pas représentatives de l'ensemble.

14.3.1.2. Les modes de collecte des informations

La collecte de ces informations doit cependant donner lieu à des mesures précises et homogènes, de façon à permettre la comparaison d'informations de différentes origines et le calcul d'indices caractérisant la situation actuelle sur les plans physique, humain et économique.

Ces informations peuvent être réunies de plusieurs manières : recensement exhaustif, sondage par choix raisonné, monographie. Cependant la méthode généralement adoptée, au moins pour les éléments humains et économiques lorsque le nombre d'habitants le justifie, est l'enquête par sondage aléatoire qui garantit la précision et l'homogénéité des mesures tout en limitant le coût des études. La précision de chaque mesure est définie car chacune est assortie de la marge d'erreur probable inhérente à l'enquête. Toutes les mesures sont comparables car elles sont faites suivant les mêmes principes et sur des échantillons représentant l'ensemble du domaine étudié. Par contre les résultats ne sont pas localisés ; ils n'ont aucune valeur à un niveau inférieur à celui des strates prévues par le plan de sondage ; aucune des mesures individuelles ne permet de caractériser la zone où elle a été faite.

14.3.2. L'étude des sols

14.3.2.1. Rôle et conception de l'étude des sols

Cette étude joue un rôle capital dans l'inventaire du potentiel de production dont les sols sont l'un des éléments fondamentaux avec le climat, le travail, les connaissances et le capital.

L'étude des sols apporte également des informations décisives dans l'analyse de la situation économique présente car elle permet de comprendre et d'apprécier les systèmes actuels de production et leurs conséquences prévisibles.

Le pédologue doit ensuite participer à la définition de la nature et des méthodes de production ainsi qu'au choix des interventions.

Comme pour les autres enquêtes, la conception de l'étude des sols est subordonnée à l'observation de principes généraux d'ordre politique, économique, social, technique ou financier qui, fixés par le gouvernement, devront inspirer toute la planification.

Il s'agira, par exemple :

- de respecter un taux de boisement minimum (20 à 30 % en Afrique Soudano-guinéenne).
- d'établir ou de conserver les équilibres nécessaires entre les productions des différentes régions, entre les activités agricoles, zootechniques et forestières, entre l'exportation et la consommation locale.
- de prendre en considération certains obstacles qui, sur le plan économique, peuvent s'opposer à l'emploi de certains facteurs coûteux (fumures minérales et équipements).
- de tenir compte de l'évolution des prix mondiaux ou intérieurs et de la politique que le gouvernement compte suivre en matière d'échanges; ainsi la baisse des cours de l'arachide pourrait motiver, dans certains cas, une régression de la production commercialisable et, en conséquence, une réduction des surfaces consacrées à cette culture.

Il s'en suivra des directives qui influenceront nécessairement sur les objectifs de l'étude des sols et sur son interprétation qui seront fonction d'alternatives telles que :

- possibilité ou impossibilité d'envisager la mise en valeur de terres nouvelles gagnées sur la forêt ou la savane,
- spéculations et cultures à écarter ou, au contraire, à favoriser dans l'ensemble ou dans telle partie de la région,
- culture motorisée, attelée ou manuelle dont les effets sur la structure d'un même sol et par conséquent sur sa résistance à l'érosion sont différents,
- possibilité ou non de recourir aux fumures organiques ou minérales; indépendamment d'autres éléments pouvant apparaître à la suite des enquêtes, cette alternative conditionne la durée des jachères et même l'utilisation de certains sols médiocres,
- emploi ou non de variétés sélectionnées particulièrement délicates dont les exigences peuvent être incompatibles avec l'utilisation de certains sols médiocres.

14.3.2.2. Eléments d'information à fournir au pédologue

Le pédologue devra avoir connaissance :

- des méthodes d'investigation appliquées par les autres spécialistes de l'équipe (cf. 14.3.1.)
- des directives résultant des principes généraux présidant à la planification (cf. 14.3.1.)
- des moyens en personnel et matériel mis à sa disposition (véhicules, outillage, fonds de cartes, photographies aériennes, cartes géologiques, etc ...)
- des crédits disponibles pour travaux de laboratoire
- de la durée impartie aux études

- des documents de base disponibles : rapport d'études antérieures, rapports et statistiques administratifs, données climatologiques, résultats d'expérimentation culturale, notes sur les exigences édaphiques particulières aux différentes cultures, etc ...

Ces éléments lui seront d'autant mieux connus que le pédologue aura participé à toutes les phases préparatoires de l'étude.

14.3.2.3. La mission du pédologue

Compte tenu des éléments d'information qui lui auront été fournis préalablement (cf. 14.3.2.2.) le pédologue :

- a - apporte à l'équipe d'étude, avec une précision du même ordre que celle requise des autres spécialistes (cf. 14.3.1. et 14.3.1.2.) des méthodes exposées plus loin (cf. 14.3.2.4) définition et inventaire des principaux sols de la région, potentialités agronomiques des sols et leur évolution prévisible en fonction des cultures et techniques culturales, propositions d'utilisation des sols.
- b - participe à la rédaction du rapport général en présentant des résultats et des propositions sous une forme déterminée en accord avec le chef de mission. Il prépare une notice explicative rédigée en des termes aisément compréhensibles; son rapport fera ressortir notamment :
 - la méthode de travail,
 - les facteurs de pédogénèse : roche-mère, relief, hydrographie, climatologie, végétation naturelle, occupation humaine,
 - les principales unités de sols, leur étendue et leur mode de répartition, les résultats d'analyse physique et chimique de quelques profils considérés comme représentatifs de celle-ci.

- des appréciations sur les aptitudes et les contraintes des sols
 - les correspondances avec des sols d'autres régions ou pays où une expérimentation agronomique a été conduite
 - les potentialités agronomiques des principales unités des sols et leur évolution prévisible en fonction des utilisations possibles et de techniques culturales définies ou à définir
 - des propositions relatives à l'utilisation des principales unités de sols
- c - participe aux travaux de synthèse qui permettront successivement (cf. 1) d'analyser la situation économique, de définir des objectifs de production et de proposer des interventions.

14.3.2.4. Les méthodes de connaissance des sols

Le pédologue les choisira parmi les suivantes, en accord avec le responsable de l'équipe.

- définition et inventaire des sols de la région
- utilisation et vérification des cartes pédologiques existantes.
- établissement d'une carte de reconnaissance par les méthodes habituelles, à l'échelle du 1/100.000 en général.
- enquête pédologique par sondage aérotaire.

égion étudiée,
visée en strates

[illegible]

Les différents sols et leurs caractéristiques sont d'abord définis par les méthodes classiques au cours d'une première reconnaissance de la région.

Les superficies qu'ils occupent sont ensuite évaluées par la méthode des sondages aréolaires. Dans cette méthode l'unité étudiée est un rectangle où le pédologue relève les différents sols le long d'un cheminement axial. La région est divisée en carrés égaux (leur côté peut avoir une longueur de quelques kilomètres) dont l'ensemble constitue la base de sondage au premier degré. Chaque carré est ensuite divisé en rectangles égaux dont un certain nombre est choisi par sondage aléatoire au deuxième degré. La base de sondage est découpée en strates homogènes du point de vue de la pédogénèse ; cette stratification est établie à l'aide des renseignements disponibles sur les facteurs de formation des sols (roche-mère, climat, relief, végétation naturelle, occupation humaine) ; ces critères ayant une influence directe sur les caractéristiques des sols étudiés, la stratification peut être excellente lorsque les variations des facteurs de pédogénèse à l'intérieur de la région sont bien connues.

Cette méthode permet d'obtenir rapidement et avec des moyens limités la superficie couverte par les différents sols relevés. Ces résultats sont assortis d'une estimation de leur précision qui peut être assez élevée si la stratification et le plan de sondage sont préparés correctement. L'enquête pédologique par sondage donne donc des résultats comparables à ceux des études faites dans les autres domaines humains, agricoles ou économiques.

A la différence des deux méthodes précédentes, l'enquête par sondage aréolaire ne permet pas de localiser les différents sols à un niveau inférieur à celui de la strate.

Cet inconvénient est mineur pour l'étude d'un plan de développement puisque les informations recueillies dans les autres domaines qui utilisent également la méthode des sondages (démographie, activités agricoles, budgets familiaux) ne peuvent pas non plus être localisés. Par contre les méthodes classiques bien qu'aboutissant à une représentation cartographique ne permettent pas de calculer la précision des résultats ; elles semblent en outre demander des crédits et des délais bien supérieurs pour donner des estimations de superficie aussi détaillées.

14.3.2.5. Estimation du potentiel de production
et analyse de la situation économique

Les rendements des différentes cultures avec les techniques actuelles sont donnés par les enquêtes agricoles. Leur mesure doit être faite en liaison avec le pédologue pour que les relations entre les rendements et les sols puissent être précisées. Ceci implique que les types de sol des champs où sont mesurés les rendements soient définis et rattachés à ceux qui auront été inventoriés.

L'analyse des relations entre les rendements et les types pédologiques doit permettre de calculer le potentiel de production des sols avec les techniques culturales actuelles ; elle doit aussi déterminer :

- les effets sur les sols de différentes techniques employées par les agriculteurs pour une même production ou pour un même type pédologique.
- l'efficacité des jachères de différentes durées pour la régénération de la fertilité.
- l'adaptation des cultures (en fonction de leurs exigences définies par l'agronome) aux caractéristiques des sols sur lesquels elles sont faites.
- l'évolution antérieure des sols en comparant des zones cultivées depuis plus ou moins longtemps dans la région ou en se référant à d'autres régions comparables.
- l'évolution prévisible des sols dans l'hypothèse où aucune intervention particulière ne serait entreprise. Cette prévision sera faite en projetant les tendances antérieures qui ont été reconnues. Pour cette projection les données fournies par les autres membres de l'équipe seront utilisées.

14.3.3. Les travaux de synthèse en équipe concernant le pédologue

14.3.3.1. Examen des facteurs limitant l'utilisation des sols

Outre les directives générales fixées à la planification (cf. 14.3.2.1) d'autres facteurs qui peuvent influencer sur l'utilisation des sols et dont il convient d'apprécier les incidences possibles, apparaissent aux divers spécialistes lors des enquêtes. Ces facteurs peuvent être :

- a - d'ordre physique (de la compétence du pédologue et de l'agronome) :
- le niveau général de fertilité qui doit être pris en considération pour le développement des cultures les plus exigeantes
 - les contraintes pédologiques et notamment les risques d'érosion; la pente en particulier, peut être la cause d'échecs de mise en valeur à défaut ou en cas d'insuffisance de mesures de défense des sols contre l'érosion
 - le régime hydrique des sols (perméabilité, pouvoir de rétention, évolution de la nappe phréatique, possibilité de drainage ou d'irrigation, etc ...) dont le rôle peut être capital en matière d'affectation des sols
 - les facteurs climatiques et plus particulièrement les pluies qui, pour un sol de caractéristiques connues convenant à plusieurs cultures, déterminent le choix de la ou des cultures possibles. Le régime des pluies conditionne également le calendrier des travaux agricoles et, par conséquent, indépendamment des aptitudes des sols, intervient dans le choix des cultures : en zone soudano-sahélienne, par exemple, la période favorable aux travaux agricoles, intenses du début de la saison des pluies (préparation du terrain, semis, premier sarclage) est souvent très courte; le développement d'une culture de rapport (coton, arachide) risque de surcharger l'emploi du temps des paysans à ce moment critique, avec pour conséquence une diminution de la production vivrière, des soudures alimentaires délicates.

- le parasitisme, susceptible d'éliminer tel système d'agriculture, telle culture, telle espèce ou variété, par exemple : introduction de l'élevage en zone forestière où sévit la trypanosomiase, de la culture du coton en zone pluvieuse, de la culture d'espèces de caféiers autre que *Coffea robusta* en zones contaminées par la trachéomycose.
- b - d'ordre technique (de la compétence de l'agronome et de l'économiste)
- la difficulté d'application d'un mode de culture (motorisée, attelée ou manuelle) qui peut avoir été initialement prévu
 - les servitudes de l'assolement : durée des jachères, introduction d'un engrais vert ou de cultures fourragères ou de prairies temporaires.
 - l'insuffisance de la formation technique des cultivateurs ou le caractère diffus de l'encadrement peut contraindre à préférer des variétés rustiques et moins productives à des variétés sélectionnées, plus productives mais trop exigeantes ; ainsi les cotonniers de la variété Mono ont été utilisés dans certains pays, jusque vers 1961 pour faire place ensuite aux variétés Allen.
- c - d'ordre économique (de la compétence de l'économiste)
- l'absence ou la précarité des voies de communication dans certaines zones qui doit, surtout si des déséquilibres alimentaires sont constatés, faire rechercher un équilibre entre les cultures vivrières destinées à l'autoconsommation.
 - le prix de vente qui peut obliger à cantonner les cultures de rapport à proximité des ports (par exemple de la banane) ou des marchés de consommation afin de ne pas grever exagérément le coût de production
 - l'absence de marchés de consommation qui élimine certaines cultures
 - le coût des approvisionnements (fumures, insecticides ...) surtout quand il est alourdi par les frais de transport à longue distance, est un facteur important dans le choix des cultures.

d - d'ordre humain (de la compétence du sociologue et du démographe)

- les droits fonciers qui peuvent conduire à éliminer certaines cultures ou à faire abandonner la mise en valeur de terres apparemment disponibles
- la spécialisation professionnelle des groupes ethniques détenteurs des droits d'utilisation des terres, qui élimine certaines productions : la présence d'éleveurs peut conduire à affecter à la production animale des terres pouvant être cultivées.
- la pression démographique qui influe sur la durée des jachères et l'affectation des terres. Une forte densité de population impose des jachères courtes qui risquent d'entraîner un appauvrissement des sols ; dans ce cas la priorité sera donnée aux cultures vivrières en raison de la fréquente précarité des ressources alimentaires ; l'extension des cultures de rapport sera limitée afin de ne pas accentuer la dégradation des sols. Dans les zones surpeuplées certains sols médiocres, qui seraient autrement destinés au pâturage extensif ou à la forêt doivent parfois être affectés à la production agricole,
- le taux de population active qui indique les ressources en travail et par conséquent l'étendue des surfaces cultivées par les techniques agricoles préconisées.

14.3.3.2. Définition d'objectifs et de techniques de production

A ce stade des études de synthèse le pédologue participe au choix des productions à développer, à l'évaluation des surfaces qui leur seront affectées, à la définition des techniques culturales préconisées et à l'estimation des rendements prévisibles. Comme chacun des autres membres de l'équipe, le pédologue a, dans son domaine propre, un rôle alternativement décisif et consultatif. Dans le premier cas, il fait valoir et justifie les contraintes absolues qui doivent être respectées faute de pouvoir être levées ; dans le deuxième cas, il explicite les conséquences des propositions faites par les autres spécialistes pour préciser des choix incertains.

Ces décisions tiendront compte des directives générales et facteurs limitants explicités précédemment (cf. 14.3.2.1. et 14.3.3.1.)

Pour le choix des productions le pédologue indique d'abord celles qui doivent être éliminées définitivement en fonction des caractéristiques physiques et chimiques des sols, compte tenu d'autres facteurs du milieu naturel (climat, relief). Il précise ensuite les aptitudes des différents sols reconnus, en fonction des exigences des cultures envisagées ; les différents sols pouvant convenir à une même culture seront classés par ordre d'aptitude décroissante.

L'évaluation des surfaces à affecter aux différentes productions sera faite à partir de l'inventaire des sols dressé par le pédologue. Si une carte a été établie elle permettra de planimétrer les surfaces des sols aptes à chaque production. Dans le cas d'un inventaire fait par la méthode des sondages aréolaires, les tableaux de dépouillement serviront aux calculs des surfaces.

Pour la définition des techniques de production le pédologue indiquera à partir de son étude des sols et de l'analyse de leurs relations avec les rendements :

- les risques que font courir aux sols les techniques actuelles en distinguant les différentes cultures et les divers types pédologiques. Ces risques seront analysés en détail.
- les mesures qui permettent de pallier ces risques. Ces mesures seront définies à partir des observations faites localement et en se référant aux résultats obtenus par des stations de recherche situées dans des conditions écologiques comparables
- les techniques culturales actuelles qui sont les plus efficaces pour le maintien et la régénération de la fertilité en distinguant également les différentes cultures et les divers types pédologiques.
- les conséquences prévisibles de techniques culturales proposées par d'autres membres de l'équipe. Ces conséquences seront déduites des caractéristiques des sols de la région et des résultats obtenus par des essais faits dans des conditions écologiques semblables.

Les modifications à apporter à ces techniques pour maintenir la fertilité seront précisées.

L'estimation des rendements prévisibles sera fonction de bases de calcul données par le pédologue en ce qui concerne :

- les caractéristiques des sols concernés,
- l'évolution de la fertilité de chaque sol suivant la durée de son exploitation
- les effets des techniques préconisées sur les sols cultivés,
- les résultats obtenus par l'expérimentation agricole sur des stations de recherche dans des conditions pédologiques analogues.

Tous ces éléments sont étroitement liés; les interactions sont nombreuses entre la nature des productions, les caractéristiques pédologiques, les techniques culturales et les rendements. La complexité des problèmes impose une série d'approximations successives pour aboutir à une solution cohérente. Le recours aux méthodes de la recherche opérationnelle serait utile; ces méthodes impliquent une analyse minutieuse de la situation sous tous ses aspects y compris les facteurs pédologiques pour en tirer des informations qui sont nécessaires aux calculs.

1⁴.3.3.3. Propositions d'intervention

De même que le pédologue participe à la définition des objectifs et des méthodes de production, de même il doit être associé à l'élaboration des propositions d'intervention permettant d'atteindre les objectifs assignés au développement régional. Cette dernière partie du travail de synthèse doit être faite suivant les méthodes décrites au paragraphe précédent.

Les interventions qui concernent plus particulièrement le pédologue sont :

- les études pédologiques complémentaires permettant de préciser certains aspects du plan ou les conditions de sa mise en oeuvre. Le pédologue précisera les objectifs, les méthodes et les moyens de ces études.

- la mise au point des techniques de préparation et de fertilisation des sols. Le pédologue préparera les parties qui relèvent de sa spécialité dans ces programmes de recherches; il précisera les conditions dans lesquelles ils devraient être exécutés (localisation, personnel, matériel, crédit, organisation).
- l'aménagement des terres (irrigation, drainage, lutte contre l'érosion). Le pédologue fournira les caractéristiques des sols qui doivent être utilisées pour la préparation de ces aménagements.
- la vulgarisation et la formation des cadres ruraux et des agriculteurs. Le pédologue évaluera d'abord les connaissances que les producteurs et les agents d'encadrement ont actuellement dans le domaine des sols. Il définira ensuite, selon les besoins des interventions prévues, les principaux thèmes à traiter par la vulgarisation et la formation dans sa spécialité. Il devra notamment rattacher les critères traditionnels aux normes scientifiques habituelles en matière de classement des sols et d'appréciation de leur fertilité pour permettre aux agents d'encadrement de se rattacher au système de référence utilisé par les agriculteurs.

C h a p i t r e 15

LA PEDOLOGIE DANS L'ETUDE ET LA REALISATION DES PROJETS DE MISE EN VALEUR AGRICOLE

- 15.1. Place des actions agricoles dans le cadre du plan régional de développement
- 15.2. Définition d'un projet de mise en valeur agricole.
- 15.3. Amélioration des techniques culturales sans modification de l'implantation des cultures
- 15.4. Aménagement hydro-agricole
- 15.5. Modification de l'implantation des cultures
- 15.6. Introduction d'une culture nouvelle
- 15.7. Développement d'une culture
- 15.8. Augmentation du rendement de culture
- 15.9. Périmètre de colonisation
- 15.10. Contrôle de l'évolution des sols cultivés.

15.1. Place des actions agricoles dans le cadre du plan régional de développement

Les objectifs, les méthodes, la localisation et l'échelonnement des interventions de différentes natures ont été esquissés au stade du plan régional de développement. Dans le cadre général prévu par ce plan, il reste à établir pour chacune d'elles des projets de mise en valeur organisant l'utilisation du personnel ainsi que celle des moyens techniques, matériels et financiers qui peuvent lui être affectés. Ces différents projets constituent un ensemble harmonisé : le programme d'aménagement de tout ou partie de la région.

Du point de vue agricole, les projets les plus courants sont les suivants :

- amélioration des techniques culturales sans modification de l'implantation des cultures,
- aménagements hydro-agricoles (irrigation, drainage, lutte contre l'érosion),
- modification de l'implantation des cultures,
- introduction d'une culture nouvelle,
- développement d'une culture,
- augmentation du rendement d'une culture,
- création d'un périmètre de colonisation.

Dans tout ou partie d'une région, plusieurs projets agricoles sont en général combinés à d'autres actions portant sur l'infrastructure technique, économique, administrative et sociale.

15.2. Définition d'un projet de mise en valeur agricole; processus et conduite des études

Un projet de mise en valeur agricole précise les orientations générales fixées par le plan de développement. Il organise dans le temps et dans l'espace le développement de la production d'une zone bien délimitée pour lui faire atteindre les objectifs qui lui ont été assignés. Le projet est le document qui permet de rechercher les moyens nécessaires au développement de la production, de les mettre en oeuvre sur le terrain et d'en contrôler l'utilisation.

Les études de projets de mise en valeur comportent généralement deux stades :

- des études préliminaires ou de reconnaissance permettant d'établir le schéma d'avant projet.
- des études détaillées ou d'exécution portant sur des zones ou des périmètres définis par le schéma d'avant-projet en vue d'établir les projets d'exécution.

Les méthodes d'études dépendent :

- a - du stade auquel se situent ces études : reconnaissance ou exécution,
- b - de la nature de l'action, celle-ci pouvant nécessiter des investissements plus ou moins importants. Du point de vue pédologique plus particulièrement elle peut impliquer ou non une modification de l'implantation actuelle des cultures,
- c - de l'étendue de l'action : région, zone ou périmètre,
- d - du personnel (nombre et qualification), des moyens (crédits matériel) et des délais dont on dispose pour effectuer les études.

Au stade de la reconnaissance, l'étude des sols est commune à l'ensemble des programmes relatifs aux différentes actions envisagées; les méthodes s'apparentent dans tous les cas à celles des études précédemment décrites à propos de l'élaboration du plan régional (cf. n° 15.3.2.4.), en excluant toutefois l'enquête par sondages aréolaires; elles impliquent l'établissement d'une carte des sols à moyenne échelle schématique ou de reconnaissance (1/100.000 ou 1/50.000), si une telle carte n'existe pas encore.

Pour chaque type de projet agricole, il reste à examiner compte tenu de ses particularités et des moyens disponibles, les méthodes utilisables au stade des études d'exécution. Etant admis qu'une action régionale se subdivise nécessairement en actions géographiquement plus restreintes (zone ou périmètre), il ne sera fait état par la suite que d'actions peu étendues.

En pratique, plusieurs interventions pourront simultanément intéresser la même zone ou le même périmètre et il va de soi qu'elles se fonderont sur une même étude dont la conception nécessitera une synthèse des buts assignés particulièrement à l'étude de chacune des actions concourantes.

Les informations utiles devront être, en règle générale, recueillies d'une manière exhaustive, mais elles ne seront recherchées que dans la mesure strictement compatible avec les besoins particuliers du projet.

15.3. Amélioration des techniques culturales sans modification de l'implantation des cultures

15.3.1. But des études

Le schéma d'avant-projet (cf. n° 15-2) concernant cette action sur un plan géographique plus vaste a été précédemment établi à la suite d'études préliminaires de reconnaissance.

Il n'est question ici que des études détaillées portant sur des aires restreintes : zones ou périmètres géographiquement définis par le programme (quelques milliers d'hectares).

Ces études détaillées ont pour objet de déterminer pour les différents sols utilisés par les cultivateurs, les techniques culturales applicables aux cultures dont l'amélioration est prévue par le plan de développement, en tenant compte des réactions prévisibles des sols à ces techniques.

Les études seront faites par un agronome et un pédologue en étroite collaboration avec un économiste pour calculer les effets du projet, et éventuellement un sociologue pour tenir compte des problèmes humains.

15.3.2. Choix des techniques culturales

Les techniques culturales s'offrant au choix de ces spécialistes sont nombreuses : rationalisation des façons culturales, perfectionnement de l'outillage manuel, mécanisation de la culture (attelée ou motorisée), usage d'amendements ou de fumures, application de rotations culturales permettant un raccourcissement des jachères, plantes de couverture, action phytosanitaire, introduction de variétés plus productives mais plus exigeantes, irrigation (voir n° 15.4. - aménagements hydro-agricoles), etc ...

Le choix se portera le plus souvent sur plusieurs techniques dont les effets favorables sur la productivité devront se combiner. Il sera guidé par :

- les orientations sociales et économiques fixées par le plan de développement et qui ont déjà été prises en considération lors de l'élaboration de l'avant-projet dont relève l'étude détaillée actuelle; en fonction de ces orientations et des résultats des études préliminaires au programme, certaines techniques devront être éliminées d'office.
- les objectifs de productivité prévus pour chacune des cultures à améliorer.
- la connaissance des sols cultivés qui devra permettre :
 - de déterminer, en fonction des exigences particulières des cultures à intensifier, les éléments pédologiques sur lesquels une intervention serait souhaitable.
 - d'entrevoir la réaction de ces sols à l'application de telle technique ou de tel ensemble de techniques.
- les moyens prévus par le programme et l'articulation de leur mise en oeuvre (personnel d'encadrement, moyens matériels à la disposition des cultivateurs, investissements et dépenses de fonctionnement possibles au niveau des exploitations, organisation et contrôle, etc...); il pourra s'ensuivre de nouvelles éliminations s'il apparaissait impossible de se conformer aux données du programme relatives à l'échelonnement de l'application des nouvelles techniques.

15.3.3. Objectifs de l'étude des sols

L'étude des sols aura pour rôle d'apporter les éléments d'information nécessaires pour choisir les nouvelles techniques culturales. L'implantation des cultures n'étant pas modifiée, une carte pédologique détaillée n'est pas indispensable; les agriculteurs choisissent en effet leurs terres à l'aide de critères fondés sur une longue expérience pratique dans la limite de leurs droits fonciers. Une carte pédologique, si elle révélait une mauvaise localisation des cultures, ne ferait que mettre en évidence une inadaptation des droits fonciers sur lesquels aucune intervention n'est prévue dans ce type de projet par définition.

15.3.4. Eléments d'information à fournir au pédologue

Le pédologue devra être informé, en ce qui concerne la zone ou le périmètre considéré :

- des techniques culturales pouvant être envisagées et, le cas échéant de l'échelonnement de leur application (certaines techniques étant éliminées d'emblée, (cf. n° 15.3.2.),
- des objectifs de productivité prévus pour chacune des cultures à intensifier,
- des moyens disponibles pour l'étude : personnel et matériel (véhicules, outillages),
- des crédits disponibles pour travaux de laboratoire,
- de la durée impartie à ses travaux,
- des documents de base disponibles : rapports d'études de reconnaissance, cartes géologiques, photographies aériennes, données climatologiques, résultats d'essais culturaux, notes sur les exigences édaphiques particulières aux cultures pratiquées, etc ...

15.3.5. Mission du pédologue

Le pédologue devra :

- identifier les sols consacrés aux cultures actuellement pratiquées dont l'amélioration est prévue, en se référant :
 - d'une part aux unités de sols définies lors des études antérieures (plan de développement, avant-projet).
 - d'autre part aux unités de sols qu'une étude plus poussée permettra de définir dans la zone ou le périmètre considéré.
- rapprocher la dénomination de toutes ces unités de sol et leur non vernaculaire.
- estimer pour chaque unité, l'évolution du sol et de son potentiel agronomique dans l'hypothèse où les pratiques actuelles seraient maintenues.

- indiquer, en fonction des exigences particulières des cultures à améliorer, les caractéristiques édaphiques sur lesquelles une intervention serait souhaitable et les méthodes d'intervention possibles.
- estimer ensuite, pour chaque unité, l'évolution du sol et de son potentiel agronomique en fonction des nouvelles techniques culturales, que le plan de développement ainsi que l'avant-projet de mise en valeur agricole permettent d'envisager (cf n° 32), en précisant au besoin les précautions dont devrait s'assortir l'application de ces techniques.
- consigner les résultats de ces études dans une note succincte.
- sur la base de ces résultats, procéder de concert avec l'agronome et éventuellement les autres membres de l'équipe, pour chaque unité de sol, aux choix des techniques culturales les mieux adaptées aux buts poursuivis.
- fournir un rapport justifiant les conclusions auxquelles le pédologue et l'agronome ont abouti et, comportant notamment :
 - l'exposé de la méthode et du déroulement de l'étude pédologique : époque et durée de l'étude; nombre de sondages effectués par unité de sol, en vue de l'étude morphologique des profils; nature et nombre des mesures caractéristiques physiques et des analyses chimiques effectuées (par unité de sol); documents utilisés (cartes pédologiques, photographies aériennes, etc...); analogies des sols de la zone ou du périmètre avec d'autres sols étudiés ailleurs; éventuellement, un commentaire sur les difficultés rencontrées.
 - l'étude des unités de sols rencontrées (avec leur dénomination vernaculaire) et pour chacune d'elles :
 - a - l'étude morphologique d'un profil-type assortie des variations que l'ensemble des sondages a permis de constater.
 - b - les résultats des mesures de caractéristiques physiques et des analyses chimiques reconnues nécessaires pour établir les pronostics d'évolution en fonction des techniques culturales.
 - c - la nature et l'intensité des phénomènes actuels d'érosion.
 - d - le pronostic d'évolution, dans l'hypothèse où les pratiques actuelles seraient maintenues, et sa justification.

- e - l'indication des éléments sur lesquels il apparaît souhaitable d'intervenir en fonction des exigences des cultures à intensifier et l'indication des méthodes d'intervention possibles.
- f - le pronostic d'évolution en fonction des techniques culturales et sa justification circonstanciée en distinguant :
 - les techniques envisagées, mais finalement écartées
 - les techniques retenues : avec éventuellement l'indication des précautions à prendre.
- g - des propositions relatives à l'implantation d'un dispositif de contrôle de l'évolution des sols et, le cas échéant, à l'élaboration d'un programme d'essais complémentaires.

15.3.6. Méthodes de connaissance des sols

L'étude doit se borner aux sols cultivés, dont la cartographie n'est d'ailleurs pas indispensable (cf. n° 15.3.3.) et dont le repérage se fera au moyen de photographies aériennes.

Les unités de sol seront qualitativement déterminées par photo-interprétation et contrôlées sur le terrain.

Le pédologue jugera de la densité des sondages utiles, compte tenu des données de la photo-interprétation on cherchera à définir les relations existant entre la classification pédologique fournie par l'étude et celle qu'utilisent les agriculteurs. A chaque sondage il procédera à l'étude morphologique du profil. La profondeur des sondages sera généralement de 1,00 à 1,20 m dans le cas de cultures annuelles.

En règle générale, on s'efforcera de limiter le nombre de mesures et analyses à effectuer :

- en déterminant les principales propriétés physiques par l'observation directe,
- en exploitant les corrélations connues entre propriétés physiques et chimiques,
- en se basant sur la notion de "zonalité des propriétés chimiques".

Les mesures et analyses ne seront donc décidées, quant à leur nature et à leur fréquence, que dans la mesure où elles seront indispensables et immédiatement exploitables pour avancer les pronostics de réaction des sols aux techniques culturales nouvelles, car les moyens et la durée d'étude sont limités.

Parmi ces techniques on peut distinguer :

- celles dont les conséquences seront essentiellement d'ordre mécanique et physique (façons culturales rationnelles, mécanisation...) et qui influenceront donc sur la capacité de résistance des sols à l'érosion; dans ce cas, il importe surtout de connaître la texture (texture globale du profil et texture de la couche arable), la structure et la stabilité structurale.
- celles dont les conséquences seront d'ordre physique et surtout chimique (fumures, amendements...); outre la texture, la structure et la stabilité structurale, il faut connaître les facteurs physico-chimiques pouvant influencer sur la réponse des sols aux apports d'engrais ou d'amendements (pH, matière organique, capacité d'échange, taux des cations échangeables, teneur en Ca, N, P, K, humidité caractéristique du sol, réserves minérales en zones tropicales humides ou équatoriales et en zone irriguée); le choix des analyses utiles incombe au pédologue en fonction des cultures pratiquées; dans des cas particuliers, l'attention se portera sur d'autres éléments tel le fer qui exerce souvent une influence non négligeable sur la stabilité structurale des sols tropicaux et dont l'indice d'entraînement peut servir à caractériser les phénomènes de lessivage, ou tel le manganèse susceptible de passer à l'excès sous forme échangeable et ainsi devenir toxique pour les plantes cultivées.

Les techniques culturales améliorées, susceptibles d'agir sur les caractéristiques des sols dans le sens nécessaire pour assurer leur conservation d'une part et pour tenir compte des exigences particulières des cultures à intensifier d'autre part, doivent être déterminées à partir de bases expérimentales solides :

- généralement des techniques améliorées ont été mises au point, dans la région ou ailleurs (stations de recherche ou d'expérimentation, champs d'essai), en vertu de directives inscrites dans le plan national ou régional de développement (ou même antérieurement); il convient alors :
 - de comparer les sols des parcelles d'expérience aux sols traditionnellement utilisés par les cultivateurs, afin de définir les possibilités et les limites d'extrapolation des résultats.
 - d'indiquer les modifications devant être apportées à ces techniques pour les adapter à la variété des situations locales.

- de prévoir éventuellement des essais complémentaires, avec leur programme et leur localisation, qui permettront des ajustements en cours d'opération.
- dans le cas contraire, certainement exceptionnel puisqu'il impliquerait une grave lacune dans les études de planification, des essais culturaux devraient être préalablement entrepris sur des sols représentatifs de la zone.

Les pronostics de réaction des sols à de nouvelles pratiques culturales reposeront sur des analogies permises par le contrôle de l'évolution des sols lors d'expériences du genre précédemment évoqué : la comparaison des sols des parcelles d'expérience, aux sols étudiés présentement permettra de définir les possibilités et les limites d'extrapolation des données expérimentales.

15.4. Aménagements hydro-agricoles (irrigation, drainage lutte contre l'érosion

15.4.1. Irrigation

15.4.1.1. But des études

Le schéma d'avant-projet d'action agricole relatif aux aménagements hydro-agricoles, qui est étayé par des études de reconnaissance, fixe en particulier la localisation des périmètres irrigables et l'ordre d'urgence de leur aménagement.

On aborde ici les études détaillées nécessaires à l'établissement du projet d'aménagement de l'un de ces périmètres. Ces études exigent beaucoup de soins car ce genre d'aménagement implique des investissements importants dont il faut garantir le succès par des opérations minutieusement contrôlées. Elles ont pour but de fournir :

- a - à l'ingénieur chargé de l'étude des ouvrages, les données qui lui permettront de choisir la méthode d'irrigation, puis de déterminer les doses et la fréquence des arrosages afin de calculer les ouvrages :

- eau utile,
 - caractéristiques physiques du sol conditionnant la présence et la dynamique de l'eau nécessaire aux plantes cultivées : structure et stabilité structurale, profil des sols, densité apparente, texture, perméabilité en place, profondeur atteinte par les racines, capacité utile, humidité équivalente (différence entre le taux d'humidité à $mF = 3$ et le taux d'humidité au point de flétrissement à $pF = 4,2$).
 - profondeur et relevé du niveau imperméable et de la nappe phréatique qui doit être connue jusqu'à 4 m en quelques points et 2 m partout.
 - salinité et sens de l'écoulement des eaux souterraines.
 - salinité et teneur en alcalis des sols halomorphes.
- b - à l'agronome chargé de la mise en valeur du périmètre, les données qui lui permettront, compte tenu de l'évolution probable des sols du fait de l'irrigation, de décider soit de l'implantation des cultures si celles-ci sont déjà définies, soit des cultures possibles et de leur implantation.

15.4.1.2. But des études pédologiques

L'étude des sols aura pour rôle d'apporter les données mentionnées ci-dessus à l'exception seulement de celles qui pourraient, dans certains cas particuliers, ressortir de la compétence d'un hydrologue (hydrologie souterraine notamment).

15.4.1.3. Eléments d'information à fournir au pédologue

Le pédologue devra avoir été informé :

- de la nature et du degré de précision des données qu'il lui appartient de fournir à l'ingénieur chargé de l'étude des ouvrages et à l'agronome.
- des cultures prévues sur le périmètre si elles ont déjà été déterminées et des méthodes culturales envisagées, Des modifications pourront d'ailleurs être apportées sur sa proposition.

- des moyens mis à sa disposition, en personnel et en matériel : véhicules, outillage, fond de carte à grande échelle et en courbes de niveau établi pour les besoins de l'ensemble des études, photographies aériennes, carte des sols préexistante ou dressée lors des études préliminaires, carte géologique etc ...
- des crédits disponibles pour travaux de laboratoire
- de la durée impartie à ses travaux
- des documents de base disponibles : rapport des études de reconnaissance, données climatologiques, rendements actuels des cultures, résultats d'essais cultureux dans d'autres périmètres irrigués, notes sur les exigences édaphiques particulières aux cultures prévues ou à définir, etc ...

15.4.1.4. Mission du pédologue

La mission du pédologue consistera à :

- recueillir les données utiles à l'ingénieur chargé de l'étude des ouvrages (cf n° 15.4.1.1. et 15.4.1.2.) et étudier la stabilité structurale des sols à l'intention de l'agronome.
- cartographier ces données à grande échelle (généralement au 1/10.000 parfois au 1/5.000 sur un fond de carte fourni avec un croquis de situation).
- dresser à la même échelle, une carte de l'utilisation possible des sols du périmètre dont les caractéristiques seront définies, compte tenu de l'évolution qui résultera de l'irrigation, en fonction soit des besoins des cultures, si celles-ci sont déjà définies, soit des aptitudes des sols si le choix des cultures n'a pas encore été arrêté.
- établir un rapport indiquant notamment :
 - a - l'exposé de la méthode et du déroulement de l'étude des sols : époque et durée; nombre de sondages effectués par unité de sol, en vue de l'étude morphologique des profils; nature et nombre des mesures de caractéristiques physiques et des analyses chimiques effectuées (par unité de sol); documents utilisés (cartes pédologiques et géologiques, photographies aériennes, etc ...); analogies des sols du périmètre avec d'autres sols étudiés ailleurs; éventuellement commentaires sur les difficultés rencontrées.

- b - les caractéristiques des unités de sols représentées sur la carte et pour chacune d'elles :
 - la surface totale
 - leur niveau de fertilité
 - l'étude morphologique d'un profil-type assortie des écarts révélés par l'ensemble des sondages pratiqués.
 - les résultats des mesures de caractéristiques physiques et des analyses chimiques.
 - les précautions nécessaires dans la correction du micro-relief.
 - le pronostic d'évolution du fait de l'irrigation.
- c - des propositions relatives à l'implantation d'un dispositif de contrôle de l'évolution des sols et d'expérimentation des cultures à introduire.

15.4.1.5. Méthode de connaissance des sols

- Densité des sondages : Elle se détermine en faisant appel aux notions d'unité cartographique de base et d'efficience pédologique permettant de définir successivement une "densité idéale" d'observations pédologiques pour l'échelle considérée et une "densité pratique".

En prenant $1/4 \text{ cm}^2$ comme unité cartographique de base, la densité idéale sera :

au $1/10.000$: 1 sondage par $0,25 \text{ ha}$ de terrain (4 par ha)
au $1/5.000$: 1 sondage par $0,0625 \text{ ha}$ de terrain (16 par ha).

La densité pratique est liée :

- au degré de précision que l'on veut obtenir sur la carte
- aux conditions du milieu (savane, forêts)
- aux moyens utilisés (photo-aérienne),
- aux capacités du pédologue.

La réalisation idéale d'une observation pour $1/4 \text{ de cm}^2$ de carte nécessiterait un temps beaucoup trop long et des moyens trop importants. Le nombre d'observations ne résulte donc pas d'un quadrillage systématique de la zone à cartographier; il est fonction de ce que Boulaine a appelé l'"efficience pédologique", symbolisée par la lettre K. Le coefficient K dépend des documents existants (carte topographique, photo-aérienne, études antérieures), de la nature du terrain (relief, végétation), du pédologue (plus ou moins expérimenté),

de l'époque du travail. En fonction des différentes valeurs de K (1) le nombre d'observations à faire par cm² de carte pourrait être :

K = 1	4	observations
K = 5	0,8	"
K = 10	0,4	"
K = 20	0,2	"

Il appartient au pédologue de chiffrer K après une reconnaissance du périmètre et l'examen des documents photographiques et cartographiques disponibles.

Il arrive que l'on adopte une densité réelle inférieure à la densité pratique. Pour une étude de périmètre irrigable, la précision requise exige que l'on s'en tienne à la densité pratique.

- Etude morphologique du profil : Une description du profil sera faite à chaque sondage.
- Mesure des caractéristiques physiques et analyses chimiques : Les mesures et prélèvements d'échantillons se feront tous les N (généralement 10) sondages (Economies possibles cf n° 36). Les analyses chimiques chercheront à déterminer les éléments essentiels pour les productions envisagées et les techniques culturales prévues. Dans le cas où la zone étudiée est déjà cultivée les résultats d'analyse seront rapprochés des rendements obtenus pour permettre de les interpréter.
- Cartes des propriétés des sols : Les propriétés des sols reconnues par les mesures et analyses seront cartographiées à l'échelle d'exécution retenue :
 - soit synthétiquement en ce qui concerne les résultats intéressant le responsable de l'étude des ouvrages.
 - soit par propriété ou groupe de propriété, selon les besoins de la cartographie des sols, pour les résultats intéressant l'agronome.

Les cartes dressées comme ci-dessus (par exemple : texture, fertilité, perméabilité), les résultats d'analyse et l'observation des cultures en place ou d'essais, permettent de définir :

-
- (1) K = 1 - en conditions les plus mauvaises; peu ou pas de documents de base, pédologue inexpérimenté, paysage très couvert ou montagneux, époque défavorable.
K = 5 et K = 10 sont deux valeurs intermédiaires.
K = 20 en conditions optima : tous les documents de base sont à la disposition du pédologue; leurs échelles sont en accord avec l'échelle de la cartographie demandée; le pédologue est expérimenté, le paysage facilement "lisible", l'époque du travail optimale.

- des unités de sol convenant ou non aux cultures prévues.
- des unités d'aptitudes culturales différentes, dans le cas où le choix des cultures n'est pas arrêté.

15.4.2. Assainissement des zones humides

Les études détaillées nécessaires à l'établissement d'un projet d'assainissement exigent, comme celles d'un projet d'irrigation beaucoup de soins en raison de l'importance des investissements.

Elles ont pour but de fournir :

- a - à l'ingénieur chargé de l'étude des ouvrages, les données nécessaires à la conception des ouvrages et au calcul de leurs débits :
 - durée admissible et hauteur de submersion des cultures.
 - niveau optimal de la nappe.
 - pluviométrie de la région et pluie critique.
- b - à l'agronome chargé de la mise en valeur du périmètre : les données qui lui permettront, compte tenu de l'évolution prévisible des sols du fait de l'assainissement de décider soit de l'implantation des cultures si celles-ci sont déjà définies, soit des cultures possibles et de leur implantation.

Les données (a) sont de la compétence d'un agronome et d'un hydrologue.

L'étude proprement dite des sols n'intervient qu'en (b). Elles se concrétiseront par une carte à grande échelle généralement au 1/10.000 ou parfois au 1/20.000.

15.4.2.1. Eléments d'information à fournir au pédologue

(voir irrigation n° 15.4.1.3.)

15.4.2.2. Mission du pédologue

- Définir et cartographier à grande échelle les unités de sol du périmètre (1/10.000 ou 1/5.000 sur le fond de carte fourni avec croquis de situation), compte tenu de l'évolution qui résultera du drainage et en fonction, soit des besoins des cultures si celles-ci sont déjà définies, soit des aptitudes culturales des sols si le choix des cultures n'a pas encore été arrêté.
- Evaluer le niveau de fertilité des sols.
- Etablir un rapport sur le modèle proposé ci-dessus (cf n° 15.4.1.4.).

15.4.2.3. Méthodes de connaissance des sols

- Densité des sondages (cf. n° 15.4.1.5.; le travail de terrain n'est possible qu'en saison sèche.
- Etude morphologique : une description de profil à chaque sondage.
- Caractéristiques physiques et chimiques : les mesures et prélèvements d'échantillons se feront tous les N (généralement 10) sondages, (économies possibles cf n° 15.3.6.).

Les caractéristiques utiles sont : la texture, la structure, la stabilité culturale et le pH.

- Analyses chimiques (cf n° 15.4.1.5.)
- Carte des sols (cf n° 15.4.1.5.).

15.4.3. Lutte contre l'érosion

15.4.3.1. But des études

En toutes situations, la lutte contre l'érosion implique :

- l'utilisation rationnelle des sols en évitant, autant que le permettent les conditions humaines et économiques, de livrer les terres à pentes excessives aux cultures annuelles surtout s'il s'agit de cultures sarclées ou couvrant peu le sol.

- l'emploi de méthodes culturales capables de réduire le ruissellement et de contribuer à la stabilité structurale des sols.

En Afrique intertropicale, ces précautions ne suffisent plus dès que la pente des terres consacrées aux cultures annuelles atteint environ 5 % et il devient alors nécessaire de prévoir des travaux anti-érosifs spéciaux.

Tout programme d'action agricole doit, en fonction de la connaissance des sols acquise lors des études préliminaires à son élaboration (carte schématique ou carte de reconnaissance à moyenne échelle), comporter des directives générales touchant l'utilisation rationnelle des sols, ainsi que les méthodes culturales et les travaux spéciaux appropriés aux différents sols identifiés à ce stade des études. Il doit définir également les zones et périmètres où des travaux spéciaux s'imposent et où des dispositifs expérimentaux seront à installer qui permettront de préciser certaines données utiles au calcul des ouvrages.

Dans chaque zone ou périmètre, l'établissement des projets de travaux antiérosifs spéciaux nécessite des études détaillées exigeant beaucoup de soins, car ce genre de travaux implique des investissements importants, dont il faut garantir le succès, et des opérations minutieusement contrôlées.

Il s'agit de fournir :

- a - à l'ingénieur chargé du choix et du calcul des ouvrages :
 - une étude topographique détaillée (relief et microrelief), et l'établissement d'une carte en courbes de niveau à grande échelle (1/20.000 à 1/5.000).
 - une étude hydrologique : temps de ruissellement, pluie critique, coefficients de ruissellement, etc...
 - une étude des sols le renseignant sur les caractères de l'érosion actuelle et sa répartition, les roches-mères, les propriétés physiques des différents sols (profondeur, texture, structure et stabilité structurale, perméabilité, capacité d'infiltration) et pour chacun d'eux, les travaux recommandés en fonction du maximum d'érosion admissible (en tonnes par ha et par an).
- b - ultérieurement, à l'agronome chargé de la mise en valeur de la zone ou du périmètre :
 - un complément à l'étude des sols ci-dessus qui, compte tenu des systèmes d'ouvrages adoptés, donnera tous les éléments nécessaires pour détailler les précautions d'ordre cultural souhaitables sur les différents sols et indiquera l'évolution prévisible de ces sols. Ce complément d'étude portera sur les caractéristiques chimiques et le niveau de fertilité.

15.4.3.2. Rôle de l'étude des sols

Outre les éléments prévus ci-dessus, l'étude des sols devra apporter simultanément les éléments pédologiques utiles aux autres interventions prévues dans la zone ou le périmètre. Elle suivra immédiatement l'étude topographique.

15.4.3.3. Eléments d'informations à fournir au pédologue

Le pédologue devra avoir été informé :

- de la nature et du degré de précision des données qu'il lui appartient de fournir à l'ingénieur chargé de l'étude des ouvrages antiérosifs et à l'agronome (cf n° 15.4.3.1.)
- de l'implantation du dispositif expérimental
- éventuellement des cultures déjà prévues
- des méthodes culturales envisagées (sous réserve de modifications suivant ses propositions) ou celles parmi lesquelles un choix est possible.
- des moyens mis à sa disposition, en personnel et en matériel véhicules, outillage, fond de carte à grande échelle et en courbes de niveau établi pour les besoins de l'ensemble des études, photographies aériennes, carte des sols à moyenne échelle préexistante ou dressée lors des études préliminaires au programme, carte géologique, etc ...
- des crédits disponibles pour travaux de laboratoire
- de la durée impartie à ses travaux
- des documents de base disponibles : rapport des études préliminaires, données climatologiques, résultats d'essais culturaux, etc ...

15.4.3.4. Mission du pédologue

Le pédologue aura pour mission :

- de recueillir les informations prévues aux n° 15.4.3.1. et 15.4.3.2. ci-dessus.

- de cartographier ces données à grande échelle (1/20.000 à 1/10.000 sur le fond de carte fourni avec croquis de situation).
- de dresser éventuellement, à la même échelle, une carte des sols (carte d'application) dont les unités seront définies en fonction des besoins des autres interventions.
- d'établir, en adaptant le modèle proposé pour les projets d'irrigation (cf n° 15.4.1.4. ci-dessus) un rapport qui, en conclusion, indiquera les travaux antiérosifs recommandés.
- d'assister, lors du choix définitif des systèmes et ouvrages antiérosifs, l'ingénieur responsable.
- de fournir à l'agronome le complément d'étude prévu aux n° 15.4.3.1. et 15.4.3.2.).

15.4.3.5. Méthodes de connaissance des sols

Les méthodes s'apparentent aux méthodes exposées précédemment pour les projets d'irrigation (cf n° 15.4.1.5.) sous réserve d'une adaptation tenant strictement compte des besoins de l'étude de conservation des sols et des autres interventions éventuellement conjointes.

15.5. Modification de l'implantation des cultures

15.5.1. But des études - rôle de l'étude des sols

Elles ont pour but de préparer une redistribution des cultures pratiquées par des exploitations existantes afin d'utiliser au mieux les aptitudes des sols. Ces études devront être détaillées afin d'apporter à l'agronome, responsable de cette opération, une connaissance du milieu physique et humain d'autant plus précise que celle-ci se situe dans une aire relativement restreinte (zone ou périmètre) définie par le schéma d'avant-projet.

L'étude des sols, notamment, permettra à l'agronome, également guidé par des considérations d'ordre social et économique, de conseiller les cultivateurs dans le choix de la nouvelle implantation de leurs cultures en s'aidant d'une carte des utilisations possibles des sols. Cette carte sera levée à grande échelle; cependant on dépassera rarement le 1/20.000 car les investissements prévus sont généralement plus modestes et l'intervention moins rigoureuse que dans les cas précédents.

15.5.2. Eléments d'information à fournir au pédologue

Le pédologue disposera :

- d'un fond de carte à l'échelle d'exécution de la carte des sols qu'il lui appartient d'établir.
- d'une carte de l'utilisation actuelle des sols, à la même échelle, avec croquis de situation,
- de documents de base, tels que : rapport des études de reconnaissance et carte des sols à moyenne échelle éventuellement annexée; données climatologiques, résultats d'essais culturaux, notes sur les exigences particulières des cultures considérées.

En outre il sera informé :

- des méthodes culturales ayant cours dans la zone où le périmètre est en cause.
- des rendements actuels des cultures en différentes situations.
- des moyens mis à sa disposition en personnel et en matériel: véhicules, outillage, cartes, photographies aériennes, etc...
- des crédits disponibles pour travaux de laboratoire.
- de la durée impartie à ses travaux.

15.5.3. Mission du pédologue

La mission du pédologue consistera à :

- définir et cartographier à grande échelle (1/20.000 le plus couramment) les unités de sol de la zone ou du périmètre en fonction de l'utilisation la plus conforme à leurs aptitudes culturales, les cultures devant être choisies parmi celles actuellement pratiquées (car ce type de projet ne comporte pas, par définition, d'introduction de culture nouvelle); il peut être prévu des variantes sous réserve de mesures antiérosives qui seront précisées.

- étudier les relations éventuelles entre les unités ainsi définies et les dénominations vernaculaires, ainsi que les relations entre ces unités de sols et les formations végétales lorsque les cultivateurs ont l'habitude de choisir leurs terres à l'aide de critères botaniques. Ceci permettra de simplifier et d'améliorer le travail des agents de vulgarisation qui pourront alors utiliser directement les connaissances que le cultivateur a des sols et de la végétation sans être obligés de faire une transposition souvent délicate de la nomenclature pédologique scientifique à la classification traditionnelle.
- établir un rapport indiquant notamment :
 - a - l'exposé de la méthode et du déroulement de l'étude (cf n° 15.4.1.4.)
 - b - les bases du classement des unités de sol cartographiées et l'énoncé de leurs aptitudes (et variantes possibles)
 - c - les caractéristiques morphologiques, physiques et chimiques de chacune de ces unités, leur bilan hydrique et leur niveau de fertilité.
 - d - le pronostic de l'évolution des sols et de leur potentiel agronomique consécutivement aux utilisations proposées.
 - e - des propositions relatives à l'implantation d'un dispositif de contrôle de cette évolution.

15.5.4. Méthodes de connaissance des sols

L'étude doit se borner aux sols cultivés figurés sur la carte d'utilisation actuelle car il n'est pas prévu, par définition, d'extension de la surface exploitée.

- Densité des sondages (cf n° 15.4.1.5. au 1/20.000, la densité idéale est de : un sondage par hectare. On adoptera la "densité nécessaire" calculée en effectuant la densité idéale du coefficient d'efficience pédologique correspondant aux conditions d'exécution de l'étude.
- Etude morphologique du profil : une description sera faite à chaque sondage.
- Caractéristiques physiques et chimiques : elles seront déterminées, en principe, tous les N sondages (généralement 10) dans la mesure où leur connaissance est utile pour apprécier les aptitudes des sols à l'égard des cultures considérées.

Les crédits prévus pour travaux de laboratoire pouvant être modestes, on s'efforcera éventuellement de limiter le nombre de mesures et analyses à effectuer :

- en déterminant les principales propriétés physiques par l'observation directe.
 - en exploitant les corrélations connues entre propriétés physiques et chimiques.
 - en recourant à la notion de zonalité des propriétés chimiques.
 - en interprétant les résultats cultureux.
- Carte d'utilisation possible des sols : les localisations convenant aux différentes cultures seront définies par superposition des cartes représentant les caractéristiques physiques et chimiques que le pédologue jugera significatives.

15.6. Introduction d'une culture nouvelle

15.6.1. But des études

Le schéma d'avant-projet (cf n° 15.3.2.) concernant cette action sur un plan géographique plus vaste a été établi précédemment à la suite d'études préliminaires ou "de reconnaissances". Il ne s'agit donc ici que d'études détaillées portant sur des aires restreintes : zones ou périmètres géographiquement définis par le programme (quelques milliers d'hectares). Ces études doivent permettre à l'agronome de conseiller chaque exploitant agricole dans le choix de terres satisfaisant au mieux les exigences de la nouvelle culture, compte tenu de pratiques culturales définies.

Une carte des sols établie en fonction des exigences particulières de la culture à introduire sera pour l'agronome un document de travail indispensable. Son échelle, toujours grande, sera choisie selon la surface prévue pour chaque champ cultivé, qui doit pouvoir être situé sur la carte. La notion "d'unité cartographique de base" guidera ce choix : 1 carré de 0,25 cm² sur la carte représente sur le terrain 1 ha au 1/20.000, 0,25 ha au 1/10.000.

15.6.2. Eléments d'information à fournir au pédologue

Le pédologue disposera :

- d'un fond de carte à l'échelle d'exécution de la carte des sols qu'il lui appartient d'établir,
- d'une carte de l'utilisation actuelle des sols, à la même échelle,
- de documents de base tels que : rapport des études de reconnaissance et carte des sols à moyenne échelle éventuellement annexée; données climatologiques; résultats d'essais culturaux concernant la culture à introduire (instituts spécialisés, stations expérimentales, champs d'essais).

En outre, il sera informé :

- des méthodes culturales prévues dans la zone ou le périmètre étudié ainsi que, si possible, des rendements des cultures actuelles en différentes situations,
- des moyens mis à sa disposition en personnel et matériel : véhicules, outillages, cartes, photographies aériennes, etc ...
- des crédits disponibles pour travaux de laboratoire,
- de la durée impartie à ses travaux.

15.6.3. Mission du pédologue

La mission du pédologue sera :

- de définir et cartographier à une échelle donnée (cf n° 15.4.1.4.) les unités de sols de la zone ou du périmètre en fonction des exigences particulières de la culture à introduire compte tenu des méthodes culturales prévues.
- de classer selon leur fertilité les sols aptes à porter cette culture.
- d'étudier les relations éventuelles entre ces sols et les dénominations vernaculaires, ainsi que les relations entre ces mêmes sols et les formations végétales lorsque les cultivateurs ont l'habitude de choisir leurs terres à l'aide de critères botaniques (cf n° 15.5.3.).

- d'indiquer des critères morphologiques pouvant permettre à des agents n'ayant pas de formation pédologique très poussée, d'identifier facilement les sols intéressants.
- d'établir un rapport indiquant notamment :
 - a - l'exposé de la méthode et du déroulement de l'étude (cf n° 15.4.1.4.),
 - b - les critères de classement des unités de sols cartographiées en discriminant les sols inaptes et les sols aptes à porter la nouvelle culture, ceux-ci étant, en outre, classés selon leur fertilité,
 - c - les caractéristiques morphologiques, physiques et chimiques de chacune de ces unités, leur bilan hydrique et leur niveau de fertilité,
 - d - le pronostic de l'évolution des sols et de leur potentiel agronomique après introduction de la nouvelle culture (méthodes culturales définies),
 - e - des propositions relatives à l'implantation d'un dispositif de contrôle de cette évolution.

15.6.4. Méthodes de connaissance des sols

Voir le chapitre traitant de la modification de l'implantation des cultures (cf n° 15.5.4.).

15.7. Développement d'une culture

15.7.1. But des études

Le plan de développement régional a fixé les caractéristiques de base du schéma d'avant-projet d'extension de la culture en cause dans l'ensemble de la région et notamment :

- les méthodes culturales,
- les productions à obtenir,
- l'échéancier des réalisations.

Les études préliminaires à l'élaboration du schéma d'avant-projet d'action régionale ont ensuite permis de délimiter, sur une carte à moyenne échelle (1/100.000 à 1/50.000), les zones les plus favorables à cette culture compte tenu du contexte physique et socio-économique.

Lors de ces premières études le spécialiste des sols a été amené à définir les principaux facteurs pédologiques (profondeur, horizon s'opposant à la pénétration des racines, salinité, toxicité, etc...) risquant de limiter l'extension de la culture dans la région, en tenant compte des conditions climatiques ainsi que des techniques culturales qui auront pu être proposées par l'agronome.

Il s'agit à présent d'études détaillées dans chacune des zones précédemment délimitées (quelques milliers d'hectares).

L'étude des sols, en particulier, fournira à l'agronome les éléments qui lui permettront de reconnaître les sols qui, à différents niveaux de fertilité, sont propices à la culture considérée, et de fixer son choix en tenant compte, par ailleurs, des caractéristiques sociales, techniques et économiques des exploitations agricoles locales.

15.7.2. Éléments d'information à fournir au pédologue

Le pédologue devra disposer :

- d'un fond de carte à l'échelle d'exécution de la carte des sols qu'il lui appartient d'établir.
- d'une carte de l'utilisation actuelle des sols, à la même échelle.
- de documents de base, tels que rapport des études de reconnaissance (préliminaires à l'élaboration du programme d'action régionale) et carte des sols à moyenne échelle éventuellement annexée; données climatologiques, résultats d'essais cultureux concernant la culture à développer et leur interprétation (institut spécialisés, stations d'expérimentation, champs d'essais).

En outre, il sera informé :

- des méthodes culturales choisies par l'agronome suivant les directives du plan de développement et en fonction de la situation technique, économique et sociale.
- des productions à obtenir (définies par le plan)
- des moyens mis à sa disposition en personnel et matériel, véhicules, outillage, cartes, photographies aériennes, etc...
- des crédits disponibles pour travaux de laboratoire.
- de la durée impartie à ses travaux.

15.7.3. Mission du pédologue

La mission du pédologue consistera à :

- définir plus précisément les facteurs pédologiques limitants, sommairement signalés lors des études préliminaires.
- délimiter ces facteurs limitants sur une carte à l'échelle de fond qui lui sera fourni : l'échelle de cette carte sera plus ou moins grande (1/20.000 à 1/5.000) suivant le type d'exploitation et l'échéancier des réalisations; si le programme prévoit une intervention dans les exploitations familiales existantes, l'échelle pourra être relativement petite (1/20.000) car les recommandations qui en seront tirées n'auront qu'une valeur indicative et non obligatoire pour les cultivateurs; s'il prévoit la création de grandes exploitations spécialisées, l'échelle sera beaucoup plus grande (1/5.000) afin de permettre un choix précis des terres les plus favorables avec la garantie d'une rentabilisation maximum d'investissements très importants.
- préciser, en accord avec l'agronome, et pour les différentes unités de sols définies, les techniques culturales appropriées et les rendements correspondants possibles.
- indiquer des critères morphologiques pouvant permettre à des agents n'ayant pas une formation pédologique très poussée d'identifier facilement les sols intéressants.
- établir un rapport (suivant le canevas proposé au praragraphe 15.5.3.)

15.7.4. Méthodes de connaissance des sols

Voir le chapitre traitant de la modification de l'implantation des cultures (cf n° 15.5.4.).

15.8. Augmentation du rendement d'une culture

Il s'agit ici d'études détaillées se situant dans l'une des zones définies par le schéma d'avant-projet (quelques milliers d'hectares).

L'utilité et la nature de l'intervention du pédologue sont décidées par l'agronome en fonction des éléments d'information dont il dispose sur les conditions physiques, démographiques, sociales, techniques et économiques de la zone intéressée. Du seul point de vue technique, l'augmentation du rendement peut résulter, suivant les cas, d'une modification de l'implantation de la culture ou d'une modification des techniques culturales.

Ces deux éventualités, qui peuvent parfois se combiner, seront examinées successivement.

15.8.1. Modification de l'implantation de la culture

Ce type d'intervention est généralement peu fréquent pour les cultures traditionnelles, l'expérience acquise par les cultivateurs leur permettant de choisir, parmi les terres dont ils disposent, celles qui conviennent le mieux à chaque production. Si le choix est parfois critiquable, les causes en sont généralement soit d'ordre foncier (impossibilité de mettre en valeur certaines terres faute de droits coutumiers) soit d'ordre économique (manque d'équipements ou rentabilité trop faible dans l'état actuel des techniques agricoles); ces problèmes relèvent alors du sociologue ou de l'économiste mais non du pédologue:

Dans le cas de cultures introduites récemment, par contre, le manque d'expérience peut avoir conduit les cultivateurs à commettre des erreurs dans la répartition des terres entre leurs différentes productions. Une intervention du pédologue est alors justifiée. Elle doit être conduite avec le plus grand soin car toute modification de l'implantation d'une culture peut avoir pour conséquence directe de changer la localisation de l'ensemble des productions des exploitations.

Afin de déterminer les mesures à prendre il sera d'abord demandé au pédologue :

- de déterminer les caractéristiques des divers sols de la région.
- de fournir à l'agronome des éléments permettant d'évaluer en fonction de techniques culturales définies, l'éventail des rendements de chaque culture sur les divers sols qui lui conviennent.

Si les informations données par le pédologue justifiaient une modification de l'implantation des cultures ce type d'intervention serait étudié selon la méthode proposée au chapitre 15.5.)

15.8.2. Modification des techniques culturales

Si une modification de l'implantation de la culture s'avérait inutile ou inopportune, l'augmentation du rendement devrait relever d'une modification des techniques culturales.

- a - Lorsque des techniques améliorées ont été mises au point la mission du pédologue sera d'abord :
 - de comparer les sols des parcelles d'expérience aux sols traditionnellement cultivés par les agriculteurs, afin de définir les possibilités et les limites d'extrapolation des innovations préconisées.
 - d'indiquer les modifications qu'il convient d'apporter aux techniques nouvelles mises au point ailleurs, pour les adapter à la variété des sols locaux, ainsi que les résultats qui peuvent en être attendus.
 - de fixer éventuellement le programme et la localisation des essais complémentaires à entreprendre sur les sols de la région.

- b - Lorsque des techniques améliorées n'ont pas encore été mises au point, la mission du pédologue sera d'abord :
- de définir les caractéristiques des sols cultivés afin de déterminer, en fonction des exigences particulières de la culture, les éléments pédologiques sur lesquels une intervention serait souhaitable.
 - de fixer le programme et la localisation des essais cultureux à entreprendre sur des sols représentatifs de la zone.
 - d'interpréter les résultats de ces essais afin de déterminer les techniques culturales à préconiser sur les différents sols occupés par la culture, ainsi que les résultats à en attendre.

Dans l'un et l'autre cas, les études seront conduites suivant la méthode proposée au chapitre n° 15.3. Ce type d'intervention n'est en effet qu'un cas particulier de l'amélioration des techniques culturales dont les objectifs seraient alors limités à une seule culture.

15.9. Périmètre de colonisation

15.9.1. But des études

Le plan de développement régional a fixé les directives générales du programme de colonisation de terres devant être mises en valeur, notamment :

- les cultures,
- les surfaces ou les objectifs de production,
- les méthodes culturales,
- l'échéancier des réalisations.

Les études préliminaires du schéma d'avant-projet ont permis de délimiter, sur une carte à moyenne échelle (1/100.000 à 1/50.000) les périmètres de colonisation les plus favorables compte tenu du contexte physique, social et économique. Il s'agit maintenant des études détaillées à entreprendre dans chacun de ces périmètres en vue de l'implantation des exploitations.

Une étude minutieuse du potentiel agronomique des sols est nécessaire afin de les utiliser rationnellement et de répartir équitablement les terres entre les exploitations. Elle aboutira essentiellement à une carte de l'utilisation possible des sols.

15.9.2. Eléments d'information à fournir au pédologue

Le pédologue devra disposer :

- d'un fond de carte à l'échelle d'exécution de la carte des sols qu'il lui appartient d'établir.
- de documents de base, tels que : rapport des études préliminaires à l'élaboration du programme d'action régionale et cartes des sols à moyenne échelle éventuellement annexée; données climatologiques.

En outre, il sera informé :

- de la nature des cultures prévues et, le cas échéant, de l'importance qu'il est souhaitable de leur attribuer respectivement.
- des méthodes culturales définies par l'agronome suivant les directives du plan de développement.
- des crédits éventuellement disponibles pour les travaux antiérosifs.
- des moyens mis à sa disposition en personnel et en matériel : véhicules, outillage, cartes, photographies aériennes, etc...
- des crédits disponibles pour travaux de laboratoire.
- de la durée impartie à ses travaux.

15.9.3. Mission du pédologue

La mission du pédologue sera :

- de définir et cartographier à grande échelle (1/20.000 à 1/10.000) les unités de sols du périmètre en fonction de l'utilisation la plus conforme à leurs aptitudes culturales

compte tenu des cultures et méthodes culturales prévues; l'échelle sera fixée selon la surface prévue pour chaque champ cultivé et suivant l'importance des investissements; elle pourrait être 1/20.000 si le programme prévoit l'implantation d'exploitations familiales dont les différentes parcelles ne sont pas délimitées; elle pourrait atteindre le 1/10.000 s'il est prévu de créer des exploitations spécialisées afin d'affecter les terres avec la garantie d'une rentabilisation maximum d'investissements très importants, en individualisant les parcelles.

- d'étudier les relations entre les unités de sols ainsi définies et la végétation.
- d'indiquer les critères morphologiques pouvant permettre à des agents n'ayant pas reçu une formation pédologique particulière, d'identifier facilement les sols suivant leurs aptitudes culturales.
- d'indiquer les mesures antiérosives nécessaires pour chaque sol.
- de proposer éventuellement et selon les unités de sols définies des modifications aux méthodes culturales initialement prévues.
- d'établir un rapport suivant le canevas proposé (réf. n°15.5.3) précédent, en insistant particulièrement sur le pronostic de l'évolution des sols et de leur potentiel agronomique après mise en culture (celle-ci pouvant, par suite de la rupture de l'équilibre naturel, apporter des perturbations importantes aux propriétés physiques, chimiques et biologiques des sols).

15.9.4. Méthodes de connaissance des sols.

Cette méthode sera choisie en fonction du type de mise en valeur prévue : irrigation, drainage, lutte contre l'érosion, amélioration des techniques culturales traditionnelles, etc... Suivant les cas, on se reportera à l'un ou l'autre des chapitres précédents.

15.10. Contrôle de l'évolution des sols cultivés

L'exécution d'une action de mise en valeur agricole devrait être suivie régulièrement par les représentants des principales spécialités sur lesquelles l'intervention est fondée.

Ce contrôle régulier permet de :

- perfectionner les techniques,
- remédier à des difficultés initialement imprévisibles,
- redresser les erreurs pouvant résulter d'une étude insuffisante.

Il revient au pédologue de :

- fournir, lors des études détaillées des projets faisant l'objet des rubriques précédentes, des propositions concernant l'implantation de dispositifs de contrôle.
- suivre l'évolution des caractères morphologiques, physiques et chimiques des sols en relation avec les pratiques et techniques culturales nouvelles.
- interpréter cette évolution,
- déterminer en accord avec l'agronome les remèdes possibles, en cas d'évolution défavorable.
- fixer le programme et la localisation des essais, puis interpréter les résultats expérimentaux si cette détermination implique une expérimentation complémentaire.

15-11 - B I B L I O G R A P H I E

- BERGER (J.M.) - 1961 - Observations pédologiques et agronomiques sur les champs de coton Allen. Campagne 1960 (région de Bouaké, Beoumi, Mankono, Man). O.R.S.T.O.M., Adiopodoumé, 44 p. multigr.
- BOULAIN (J.) - 1965 - Systématisation des sols et pédologie. Cah. Ing. Agron., n° 196, pp. 13-20.
- BOUYER (S.) - 1959 - Etude de l'évolution du sol dans un secteur de modernisation agricole au Sénégal. Conf. Interafr. Sols. 3. 1959. Dalaba, vol. II, pp. 841-850.
- BRUGIERE (J.M.), MARTIN (G.) - 1962 - Les études pédologiques dans les pays sous-développés en matière agricole. O.R.S.T.O.M., Brazzaville, 31 p. multigr.
- CASABIANCA (F.de) - 1965 - Etude agronomique de la cuvette d'Andranomanitsy (Province de Tuléar - Madagascar). Agron. trop., XX, pp. 627-639.
- DABIN (B.) - 1961 - Les facteurs de fertilité des sols des régions tropicales en culture irriguée. Bull. Ass. Fr. Et. Sols. n° spécial, pp. 108-130.
- DABIN (B.) - 1962 - Agropédologie : L'utilisation des études pédologiques pour la détermination du potentiel de fertilité des sols tropicaux. Bull. Techn. Inform. Ing. Serv. Agric., n° 172, pp. 3-8.
- DABIN (B.) - 1962 - Relations entre les propriétés physiques et la fertilité dans les sols tropicaux. Ann. Agron., 13, pp. 111-140.
- Etude pédologique de la plaine de Mahabo (Préfecture de Morondava) Echelle 1/5.000 - 1964 -, par BOUCHARD, TREYER, de CASABIANCA, ANDRIAMIHAINGO, ROCHE. Agron. trop. XIX, pp. 227-252.
- FORESTIER (J.) - 1957 - Rétrogradation du phosphore assimilable dans les sols Oubanguiens. Bureau des sols, Brazzaville.
- Documents techniques divers.
- Côte d'Ivoire - Perspectives décennales de développement économique et social 1960-1970.
- INSEE - Manuel pour la formation d'agents recenseurs dans le cadre d'une étude agricole par sondage dans un pays en voie de développement - Paris 1960.
- Madagascar - Plan quinquennal 1964-1968 (inscrit dans perspectives décennales).
- RCA - Avant-projet de programmation régionale de la préfecture de l'Ouham - 1964-1969.
- Sénégal - Deuxième plan quadriennal 1965-1969.
- Tchad - Etude agricole de la région du Ouaddaï - 1965, p. 10

A

- acaréens 130
- accumulation de sels 291
- accumulation diffuse (de calcaire) 281
- accumulation par érosion 61
- acidité d'échange 104
- acidité du sol 103
- adaptation (de la végétation) 146, 148
- adhésivité 81
- aggradation 262
- agrégat 71
- agrique (horizon) 322
- albique (horizon) 323
- alcalis (sols à) 250, 292
- alfisols 323
- algues 123
- alios 29
- allophane 48
- altération 54
- altitude 53
- alumine libre 109
- aluminium (migration de l') 287
- aluminium (toxicité de l') 99
- alumogel 48
- amas concrétionné 30
- amas friable 281
- amélioration des techniques culturales 372
- aménagements hydro-agricoles 378
- ammonification 118
- amorphes (produits) 47
- amphigley 289
- analyse granulométrique 87
- analyse thermique différentielle 113
- analyse thermogravimétrique 111
- anatase 46
- anauxite 44
- andosols 301
- animaux du sol 125
- anmoor 27, 268
- appauvrissement 285
- argiles (genèse des) 263
- argiles (synthèse des) 262
- argilification 263
- argilique (horizon) 322
- aridisol 323
- augite titanifère 46
- augmentation du rendement 395
- azote (cycle de l') 117
- azote minéral dans les sols 226

B

- bactéries du sol 117
- barkhane 16
- "barros pretos" 321
- bases échangeables 98, 241
- bases et fertilité 244
- battement (érosion par) 61
- beidellite 42
- bisillitisation 276
- boehmite 45
- brunizem 303
- brun subaride (sol) 304

- calcaire 66, 67
- calcaire (accumulation du) 279
- calcaire (sol) 248
- calcaire actif 248
- calcédoine 48
- calcique (horizon) 323
- calcomagnésimorphes (sols) 301
- cambique (horizon) 30, 322
- capacité d'échange 95
- capacité pour l'air 193
- carapace 29
- carbonate de calcium 39
- carbonate de magnésium 39
- carbonate de sodium 292
- carbone (cycle du) 119
- carte de généralisation 333
- carte de reconnaissance 332
- carte de reconnaissance détaillée 332
- carte détaillée 332
- carte d'utilisation des sols 340
- carte pédologique 329
- carte schématique 333
- cations échangeables 98
- cavité 78
- cellulose 32
- cendreuse (structure) 72
- chaîne de sols 329
- champignons 124
- CHANG et JACKSON (méthode) 237
- charge permanente 97
- charge variable 97
- chatain (sol) 304
- chenaux souterrains (érosion en) 62
- chernozem 304
- chlorite 43
- chlorose 248
- cimentation 83
- circulation de l'eau dans le sol 92, 189
- classe de sols (russe) 325
- classe de structure 76
- classe texturale 69
- classification (des sols) 296
- classification (unités de) 298
- classification américaine 321
- classification belge 318
- classification britannique 320
- classification française 298
- classification portugaise 321
- classification russe 324
- cliachite 48
- climat 4
- climat (et plantes) 176
- code Munsell 65
- cohésion 82
- coléoptères 134
- collemboles 130
- colonnaire (structure) 73
- complexe argilo-humique 21
- concrétion 30
- consistance 79, 80, 81
- consistance (horizon de) 29
- constituants minéraux 36, 108
- constituants organiques 32
- contraste 64
- corindon 44
- corrasion 15
- couleur (horizon de) 29
- couleur du sol 64
- croûte 29
- croûte calcaire 281
- cubique (structure) 73
- cuirasse 29, 277

D

dalle calcaire 282	développement d'une culture 392
décapage (érosion par) 61	diagnostic (horizon de) 322
déficit en eau du sol 94	diaspore 45
déflation 61	diffusion capillaire 93
dégradation (des argiles) 262	diptères du sol 134
dénitrification 119	drainage 57
depressioped 321	drainage (indice de) 193
désertique (climat) 14	dune 16
désertique (milieu) 14	duripan 322
développement de la structure 77	Dyer (méthode) 236

E

eau (déplacement de l') 92	entisol 23
eau dans le sol 91, 186	épipedon 28
eau disponible 187	epsomite 290
échangeabilité des cations 100	équatorial (climat) 8
échelle 330	équatoriale (végétation) 9
éclat 72	erg 16
élément grossier 70	érosion éolienne 61
encroûtement calcaire 281	érosion hydrique 61
enracinement 83	évapotranspiration potentielle 94
enracinement (et profondeur de la nappe) 191	évolution des sols (contrôle de l') 400
enracinement (et structure, et texture) 207	exigences des principales cultures 183, 184, 185

F

famille (de sols) 298	ferralsols 319
farineuse (structure) 72	ferrisols 319
faune du sol 125	ferrugineux tropicaux (sols) 308
fer libre 110	fersiallitiques (sols) 308
fer organique 120	fersiallitisatation 275
ferrallitiques (sols) 310	fertilité du sol (facteurs climatiques) 174
ferrallitisation 272	fertilité du sol (facteurs physiques) 186

F (suite)

feuilletée (structure) 72
fibreuse (structure) 72
fire-clay 41
fixation de l'azote 118
flétrissement (point de) 187
flétrissement physiologique 145
"fluffy" 72
FORESTIER (Indice de) 217, 220

fourmis 134
fondue (structure) 73
fragipan 322
fragment 71
frange capillaire
fulvique (acide) 34
fusion alcaline 108

G

gamme 65
géomorphologie 7, 55
gibbsite 46
gilgai 30
glacis 7
glauberite 290
glaucosite 42
gley 289
glucose 119
goethite 45

gravillon 31
grenue (structure) 74
gréseuse (structure) 73
groupe (de sols) 298
groupe global 325
grumeleuse (structure) 74
grumosolique 302
guinéen (climat) 11
gypsique (horizon) 323

H

halloysite 41
halomorphes (sols) 316
halomorphie 290
hamada 16
hématite 45
héritage 37
hisingerite 48
histique (épipedon) 28, 322
histosol 323
horizon 24, 63
horizon de profondeur 322
horizon "K" 283

horizon organique 67
humidité au champ 188
humidité édaphique 188
humification 267
humine 33
humiques (acides) 33, 34
humus 33
hydrargillite 46
hydromica 44
hydromorphes (sols) 316
hydromorphie 288
hydroxydes (accumulation des) 271

I

illite 41	Indice d'instabilité structurale (S. HENIN) 201
ilménite 37, 46	induration 277
inceptisol 323	infra-rouge (rayonnement) 114
indice de drainage 192	inondation 58
Indice de FORESTIER 217	intensité (couleur) 66
Indice de perméabilité (B. DABIN) 201	interactions (sol-climat-topographie) 143
Indice de stabilité structurale (B. DABIN) 201	interstratifié 44
Indice de structure (B. DABIN) 200	introduction d'une culture nouvelle 390
	isohumiques (sols) 304

J

juxtaposition 329

K

kaolinite 40	kaolisols 319
--------------	---------------

L

lamellaire (structure) 73	lignine 119
latérite 277	limite (des horizons) 64
lépidocrocite 46	litage 76
lessivage 284	lixiviation 286
lessivé (sol) 305	Loi de FEUNDLICH 102
leucoxène 46	lutte contre l'érosion

M

maghémite 44	matière organique 66
magnétite 44	matière organique (accumulation) 267
manganèse 47	matière organique et culture 217
marmorisation 289	matière organique et drainage 227, 268
massive (structure) 72	matière organique et sols tropicaux 212

M (suite)

méditerranéen (climat) 17	moder 27
méditerranéen (milieu) 16	modification de l'implantation des cultures 387
méditerranéens (sols) 277, 308	mollique (épipedon) 28, 322
métahalloysite 41	mollisol 323
microarthropodes 130	montmorillonite 42
microrelief 58	mor 27
microscopie électronique 115	morphologie 63
mie de pain 76	motte 71
migration des bases 286	mouvements de masse (érosion en) 62
migration de substances 283	mulch 30
minéralisation 33, 267	mull 27
minéraux bruts (sols) 299	mull (sols à) 305
modélé 55	myriapodes 135

N

nappe (érosion en) 61	nitrification 118
natrique (horizon) 30, 322	nodule 31, 281
natron 290	nontronite 42
nematodes 126	nuciforme (structure) 74
netteté 64	

O

ochrique (épipedon) 28, 322	oxique (horizon) 30, 322
ochrosol 320	oxisol 323
opale 48	

P

paraferallitiques (sols) 321	pédalfer 321
particulaire (structure) 72	pédocal 321
pâte saturée 250	pédologie et mise en valeur agricole 370
paysage	pédologue (dans une opération de développement) 353

P (suite)

pédologue (mission dans une équipe) 360
pédologue et ingénieur (relations entre) 350
pellicule rubanée 282
pénévolués (sols) 311, 312, 314
pentes 57
périmètre de colonisation 397
perméabilité 201
peu évolués (sols) 300
pF 91
pH 103, 243
pH et cultures tropicales 226
phosphates 40
phosphore 120, 230
phosphore assimilable 236
phosphore total 230
phytolithe 48
pierres 59
plaggen (épipedon) 322
Plan de développement 355
plante-sol (relations) 138
plaque (structure en) 73
plasticité 82
plinthite 323
podzoliques (sols) 306
podzolisation 284
podzols 306
polyédrique (structure) 74
porosité 78, 89
potassium dans les sols 245
potentiel de Redox 106
poudinguiforme 73
poudreuse (structure) 72
pouvoir tampon 105
pression capillaire 91
primaires (minéraux) 37
prismatique (structure) 73
profil 23
profil cultural
profil hydrique 186
protozoaires 125
pseudo-chlorite 44
pseudo-gley 289
pseudo-mycélium 281
pyrolusite 47
pyrophyllite 42

R

ravins (érosion en) 62
rayons X 113
réaction 102
reg 16
régularité (des horizons) 64
relief 58
remaniement 55, 295
ressuyage (indice de) 193
rétention de l'eau 188
revêtement argileux 84
rH2 106
rigole (érosion en) 62
rizière (fertilité d'une) 228
roche 54
roche-mère 6, 54
rubrisol 320
rutile 46

S

- sahélien (climat) 11
- salés (sols) 249
- salinité (échelle de) 251
- salique (horizon) 323
- S.A.R. 253
- savane 12
- sebkha 16
- secondaires (minéraux) 37
- semelle de labour 74
- séquence 329
- série 298
- sericite 42
- sierozem 304
- silicates 40
- slickenslide 30, 85
- smectite 42
- sodium (échangeable) 252
- sol 21
- sol (définition) 22
- sol (pourvoyeur de la végétation) 142
- sol (support de la végétation) 141
- sol-plante (relation) 138
- solod 294
- solonetz 294
- solontchak 291
- soudanien (climat) 11
- soufre 120
- soustructure 75
- sphène 46
- splash 61
- spodique (horizon) 322
- spodosol 323
- squameuse (structure) 74
- stabilité structurale 90
- stagno-gley 290
- steppe 12
- stilpnosidérite 48
- stone-line 31, 279, 295
- stratification 85
- strengite 40
- structural (horizon) 29
- structure 71, 89, 195
- structure (indice de) 201
- structure et enracinement 207, 208, 209
- structure et fertilité 198
- subangulaire (structure) 74
- sulfate de sodium 40
- sulfures 40
- surstructure 75
- synthèse 38
- système de culture 53

T

- tache 65
- tacheté (horizon) 289
- talc 42
- taranakite 40
- tension d'humidité 91
- termites 131
- textural (horizon) 29
- texture 68, 87, 196
- thénardite 40, 290
- Tir 303

T (suite)

titane 46
tourbe 268
transformation 38
triacide (réactif) 108
trona 290

tropical (climat) 11
tropical (milieu) 11
tropical black earth 321
tropical grey earth 331
Truog (méthode) 237

U

ultisol 323
umbrique (épipédon) 28, 322

unités de classification 329

V

valeur 66
variscite 40
végétation 6, 53
végétation et aménagement agricole 161
végétation et aménagement pastoral 165
végétation et foresterie 167
végétation et pédogénèse 150

végétation naturelle 152
vermiculite 43
vers de terre 127
vertisols 302, 323
vésiculaire 79
vivianite 40

X

xéromorphie 147